

# Verwerfungen

## Strukturgeologie-2012

### **Educational Material**

**Author(s):**

Burg, Jean-Pierre

**Publication date:**

2012

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007199291>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

# VERWERFUNGEN

Brüche sind planare Verformungsdiskontinuitäten, d.h. Unterbrechungen in der physikalischen Kontinuität der Gesteine, die sich infolge von Spannungen entwickeln. Geologische Brüche treten in jedem Massstab auf, so dass keine grosse Gesteinsmasse ohne sie ist. Diese Diskontinuitäten sind mit der plötzlichen Freisetzung von elastischer Energie, die in der Kruste gespeichert ist, verbunden.

Die geologischen Trennflächen haben auch grosse ökonomische Bedeutung. Im Bereich der Hydrologie und Erdölexploration ist der Verlust der Kontinuität in den intakten Gesteinen wichtig, weil er die Permeabilität, Migration und Anreicherung von Flüssigkeiten wie Grundwasser und Erdöl steuert. Oft haben sie zum Aufbau von Erzkörpern beigetragen. Reservoirs und Aquifere die von Brüchen durchzogen werden, sind gewöhnlich anisotrop, da ihr Durchlassvermögen durch die leitenden Eigenschaften der Brüche gesteuert wird, welche wiederum teilweise durch das lokale Spannungsfeld kontrolliert sind. Geologische Brüche können teilweise oder ganz durch Ausfällungen von sekundären Mineralien aufgefüllt werden, was Verwerfungen verursachen kann, oder die Rekristallisation der ursprünglichen Mineralien.

Planare Diskontinuitäten, entlang denen die Gesteine ihre Kohäsion aufgrund ihres spröden Verhaltens verlieren, werden:

- **Klüfte** (*joints*) genannt, wenn keine Verschiebungskomponente parallel zur Ebene der Diskontinuität besteht (es kann eine geringe orthogonale Trennung auftreten; Klüfte sind Dehnungsbrüche), und
- **Verwerfung** (*fault*) wenn die Blöcke zueinander, parallel zur Fläche verschoben wurden (Verwerfungen sind Scherbrüche).
- **Adern** (*veins*) wenn die Brüche mit sekundärer Kristallisation gefüllt werden.

Klüfte und Verwerfungen unterteilen Gesteine in Blöcke, dies muss im Ingenieurwesen, Steinbruch, Bergbau und in der Geomorphologie berücksichtigt werden.

## Terminologie der Verwerfungen

### Definition

Von einer Verwerfung spricht man, wenn sich zwei aneinander grenzende Gesteinsblöcke aufgrund einer angesetzten Spannung aneinander vorbeibewegt haben. Der Begriff der lokalisierten Bewegung führt zu zwei genetisch verschiedene Kategorien von Verwerfungen, die zwei grundlegende Antworten der Gesteine auf Spannung widerspiegeln: spröde und duktile Verwerfungen.

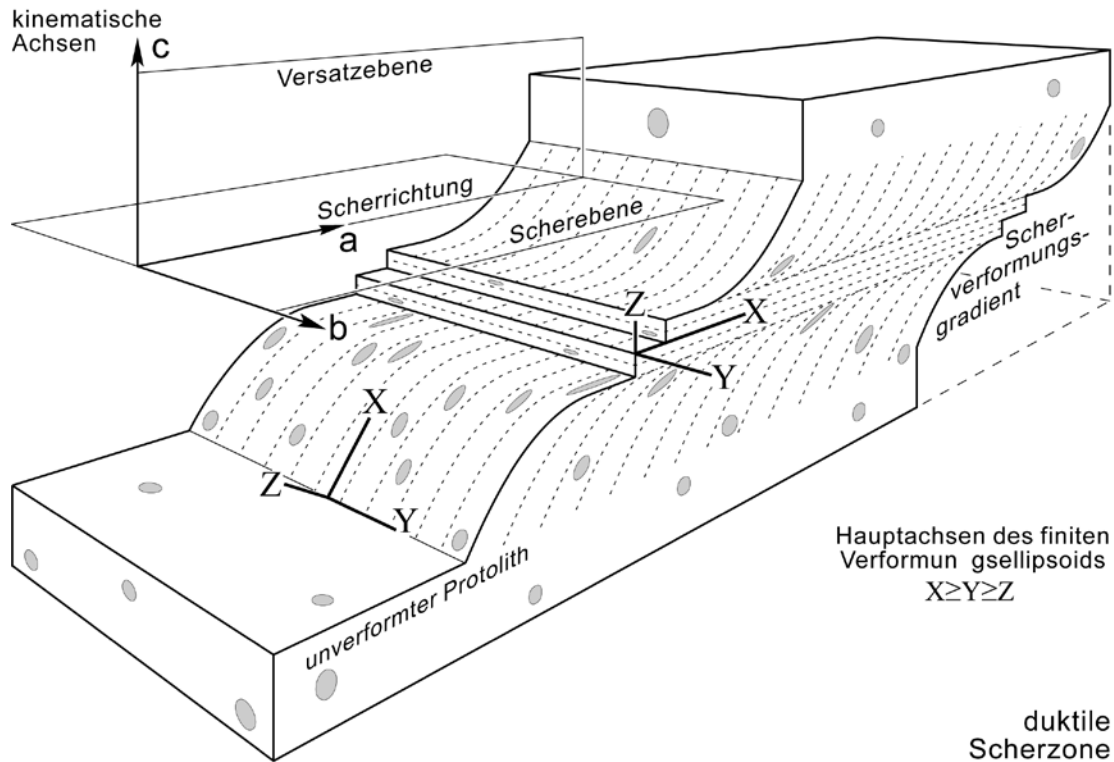
### *Spröde Verwerfung*

Eine **Verwerfung** (*fault*) ist ein Bruch zwischen zwei Gesteinsblöcken, die parallel zur Verwerfung in einer bestimmten Richtung relativ aneinander vorbeigeschoben wurden. Eine **Verwerfungs- oder Bruchzone** (*fault zone*) ist ein Gebiet, in welchem mehrere parallele oder **anastomosierende** (d.h. ausbreitende und sich wieder anschliessende) Verwerfungen vorkommen. Jeder möglicher Splitter innerhalb dieser Zone, die durch Verwerfungen begrenzt ist, ist eine **Schuppe** (*horse*). Verwerfungen und Verwerfungszonen können identifiziert werden wenn ein Erdbeben auftritt oder durch die geologische Kartierung, die zeigt, dass eine Bewegung entlang einer Diskontinuität in der Vergangenheit aufgetreten ist.

### *Duktile Verwerfung*

**Scherzonen** (*shear zone*) sind das Analog in duktilen Materialien zu Verwerfungen in spröden Materialien. Eine Scherzone ist eine Zone, in der zwei Gesteinsblöcke aneinander vorbeigeschoben wurden, ohne dass sich ein spröder Bruch entwickelt hat. Scherzonen stellen Gebiete mit duktiler ununterbrochener Verformung dar (unter ausreichend hoher Temperatur und/oder hohem Umgebungsdruck), im Gegensatz zu Verwerfungszonen, die durch örtlich spröde Deformation

gekennzeichnet sind. Scherzonen sind folglich duktile Verwerfungen, im Gegensatz zu den spröden.

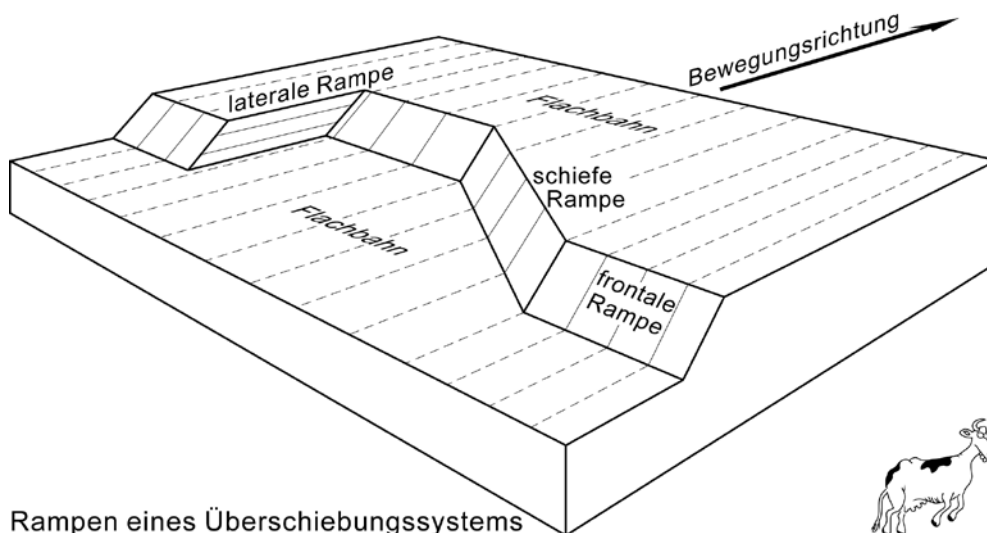


### Geometrische Klassifikation

#### **Verwerfungsebene**

Verwerfungen, die steiler sind als  $45^\circ$ , nennt man **Steilwinkelverwerfung** (*high angle faults*), solche mit geringerem Einfallen **Flachwinkelverwerfung** (*low angle faults*). Häufig sind die Verwerfungsflächen gebogen. Im Allgemeinen sind die Verwerfungsflächen gebogen. Die Wellenform der Verwerfungsflächen ist häufig in 3D seismische Daten zu sehen. Die dadurch identifizierten Verwerfungswellungen (*corrugation*) werden durch die Verknüpfung von Verwerfungssegmenten im Laufe der Zeit zugeschrieben. Eine **listrische Verwerfung** (*listric fault*) ist eine gebogene, nach oben hin konkave Verwerfung, die gegen die Tiefe hin abflacht.

Wo Flachwinkelverwerfungen sich in gut geschichteten, horizontal gelagerten Formationen ausbilden, bauen sie im Allgemeinen eine treppenförmige Geometrie (*staircase geometry*) auf. Die Stufen der Treppen werden als **Rampen** (*ramps*), die flacheren Verwerfungsflächen als **Flachbahnen** (*flats*) bezeichnet.



Rampen eines Überschiebungssystems

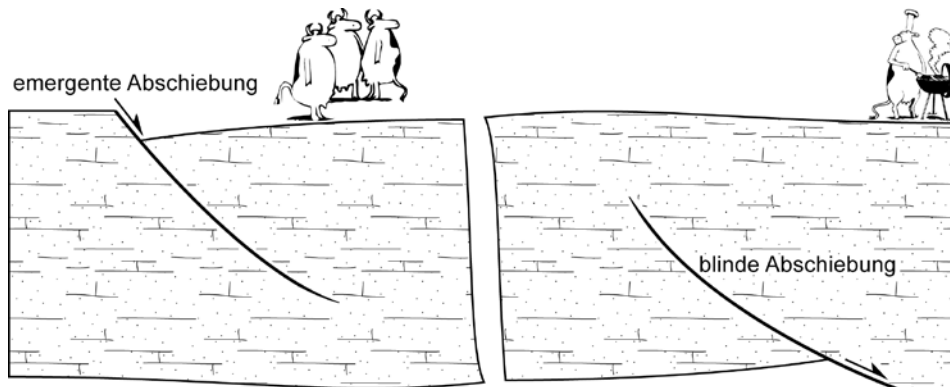


Die Flachbahnen befinden sich dort, wo sich die überliegenden Gesteine durch relativ inkompetente Formationshorizonte bewegen. Die Flachbahnen nennt man manchmal auch **décollement-Flächen**, was sich auf eine Flachbahn bezieht, an der ein Unterschied im Versatz, Deformationsstil und der Verfaltungsart zwischen den überliegenden und unterliegenden Blöcken auftritt. Die Rampen klettern durch eine bestimmte stratigraphische Abfolge, die typischerweise in einem Winkel von etwa  $30^\circ$  zur Horizontalen geschnitten werden. Rampen streichen nicht unbedingt senkrecht zur Bewegungsrichtung (**frontale Rampe**, *frontal ramp*); sie können auch schief (**schiefe Rampe**, *oblique ramp*) oder parallel zur Transportrichtung verlaufen (**seitliche Rampe**, *lateral ramp* oder *tear-fault*).

Die meisten langen Verwerfungen sind **segmentiert** (*segmented*), wobei jedes Segment seine eigene Geschichte hat; Verwerfungssegmente sind normalerweise nicht koplanar. Die Verwerfung, die die Oberfläche geschnitten hat, während sie aktiv war, wird als **emergent** (auftauchende) Verwerfung bezeichnet, im Gegensatz zu **blinden** Verwerfungen, die nicht die Oberfläche geschnitten haben. Auftauchende Verwerfungen produzieren eine Stufe in der Topographie, die **Verwerfungsböschung** (*fault scarp*).

#### Bemerkung:

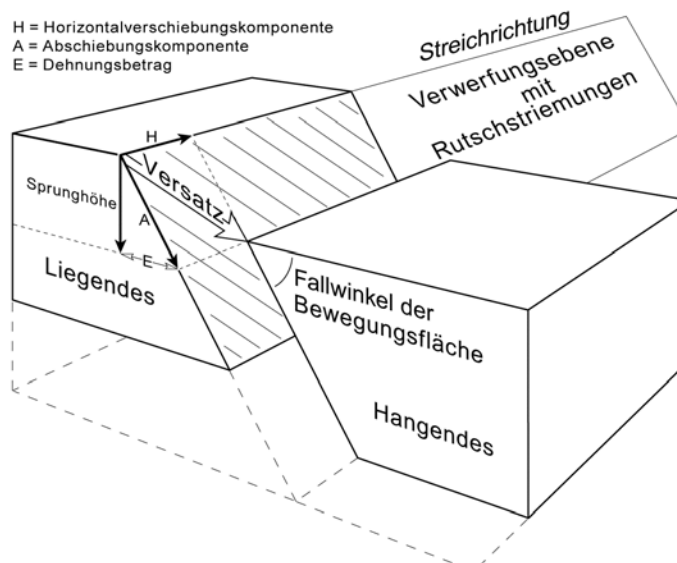
Eine auftauchende Störung ist keine erodierte Störung. Unterscheiden Sie! Die Erosion, die eine Verwerfung erreicht, hinterlässt eine Spur auf der Erdoberfläche.



#### Verwerfungsblöcke

Die beiden Gesteinskörper einer nicht vertikalen Verwerfung oder Scherzone werden oberhalb derselben als **Hangendes** (*hanging wall*) und unterhalb als **Liegendes** (*footwall*) bezeichnet.

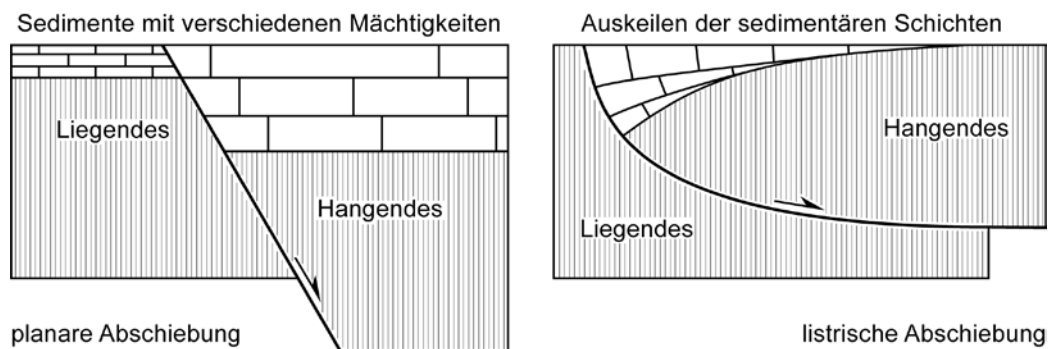
#### Geometrien von Verwerfungen und messbare Komponenten der Gleitbewegung



**Allochthon** ist ein Ausdruck für jeden Verwerfungsblock oder Gesteinskörper, der auf einer Verwerfung wesentlich bewegt worden ist. Gesteine, die über eine grosse Distanz von ihrem ursprünglichen Ablagerungsort überschoben wurden, sind **allochthon** (*allochthonous*). Sie liegen dann auf **autochthonen** (*autochthonous*) Gesteinen, die ihre ursprüngliche Lage beibehalten haben. Wenn die Relativbewegung gering ist, spricht man vom „autochthonen“ als **Parautochthon**.

### **Wachsende Verwerfungen**

**Wachsende Verwerfungen** (*growth faults*) sind während der Sedimentation aktiv und versetzen den aktiven Boden des Beckens kontinuierlich. Sie sind häufig listrisch. Sie bilden sich charakteristisch, aber nicht ausschliesslich, in Lockersedimenten, die frisch im Becken abgelagert wurden und die aktiv in Breite und Tiefe wachsen. Typischerweise werden Sie dadurch erkannt, dass die Sediment-Formationen gegen das Hangende deutlich mächtiger sind als auf dem Liegenden. Man beobachtet ein Auskeilen der Schichten vom Hangenden nach aussen.



Wachsende Abschiebungen mit assoziierten Extensionsbecken

## Kinematische Klassifikation

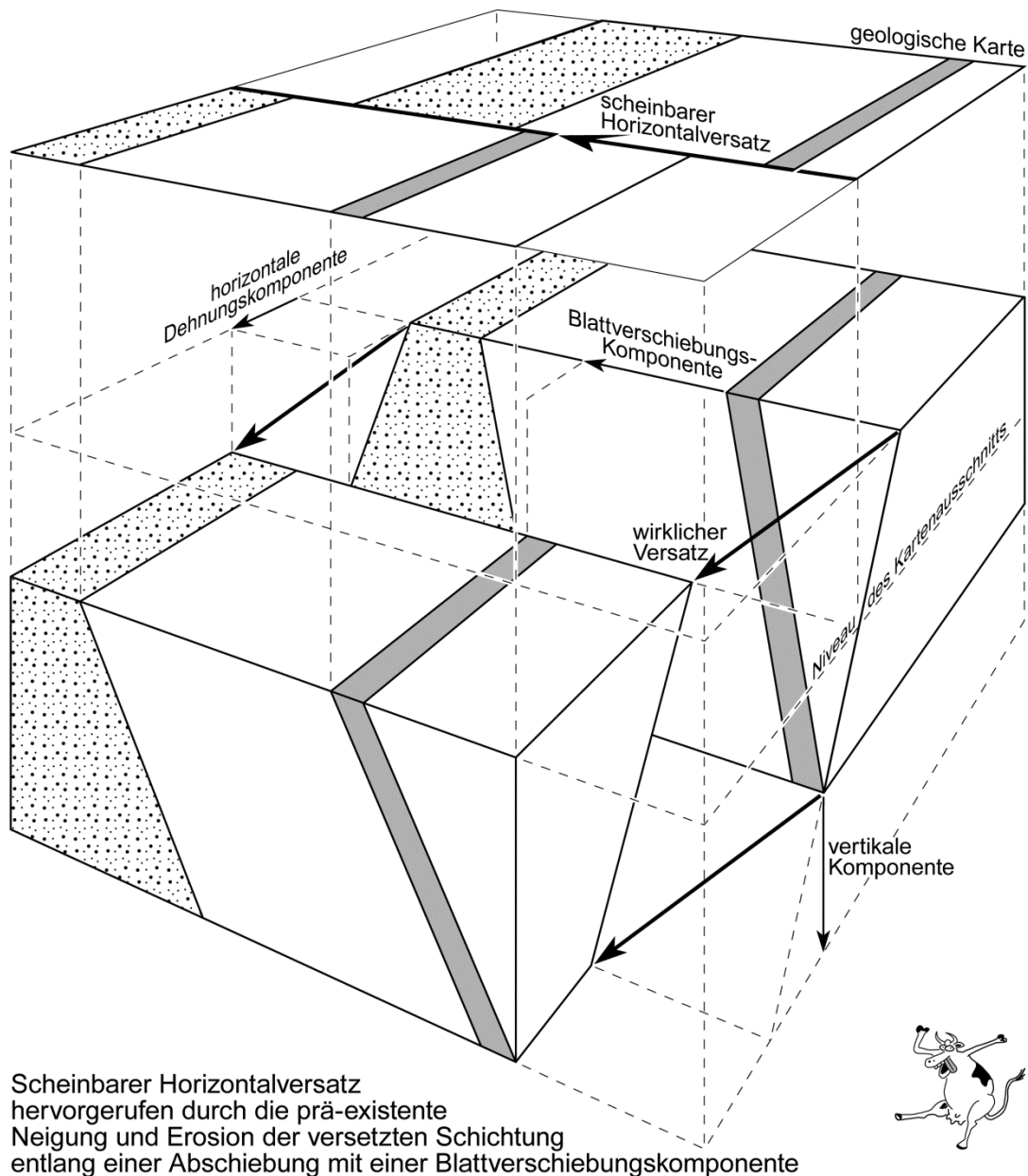
### **Verschiebungsvektoren**

Die Verschiebungsrichtung ist die Bewegungsrichtung des Hangenden relativ zum Liegenden. Der Vektor, der ursprünglich (vor der Verschiebung) zusammenfallende Punkte (*piercing points*) auf entgegengesetzten Seiten der Verwerfungsfläche verbindet, wird **Versatzvektor** (**Verschiebungsbetrag**, **Schublänge**: *net slip*) genannt. Die Länge des Versatzvektors stellt die Grösse des Versatzes auf der Verwerfung, die gewöhnlich die Addition von mehreren Bewegungen ist, dar.

Der Versatzvektor auf einer Verwerfungsfläche kann in irgendeine Richtung zeigen. Er kann in zwei zueinander senkrecht stehende Komponenten aufgegliedert werden: erstens die **Horizontalkomponente** parallel zum Streichen der Verwerfungsfläche (*strike slip*), und zweitens, parallel zum Fallen, die **Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente** (*dip slip*). Die **Neigung** (*rake*) ist der Winkel gemessen auf der Verwerfungsfläche zwischen Streichrichtung und Verschiebungsrichtung. Das **Tauchen** (*plunge*) ist der Winkel gemessen in der vertikalen Ebene, welche die Gleitlinie enthält, zwischen der Horizontalen dieser Ebene und der Verschiebungsrichtung.

Die durch eine Leitschicht in einem vertikalen Profil senkrecht zur Verwerfung gezeigte Seitenverstellung nennt man **scheinbaren Versatz** (*dip separation*). Die vertikale Komponente des scheinbaren Versatzes ist die **Sprunghöhe** (*throw*) und die Horizontalkomponente senkrecht zum Streichen der Verwerfung ist der **Dehnungsbetrag** oder **Verkürzungsbetrag** (*heave* oder *offset*).

**Achtung!** Beachten Sie, dass der scheinbare Versatz nicht mit der Abschiebungs- oder Überschiebungskomponente identisch ist, da der scheinbare Versatz von der Orientierung der Trennfläche und auch von der Art der Versetzung abhängig ist. Eine Schichtfläche allein kann nie benutzt werden, um den Versatz festzustellen.

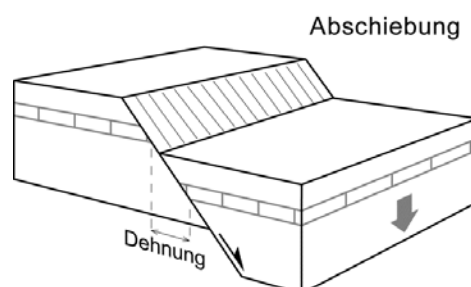


Verwerfungen werden nach der Richtung der relativen Bewegung zwischen Verwerfungsblöcken klassifiziert, die mit dem Spannungstyp, der die Verwerfung verursacht, in Beziehung steht.

### **Verwerfungstypen**

#### Abschiebung

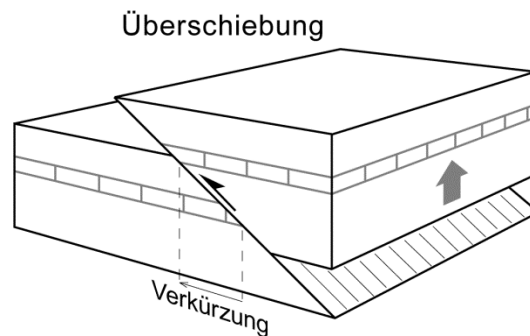
Eine **Abschiebung** (*normal fault*) ist eine Grosswinkelverwerfung, in der der Hangendblock in die Abtauchrichtung gegenüber dem Liegendblock nach unten versetzt ist. Jüngere Gesteine werden über ältere versetzt. In Vertikalschnitten durch die Verwerfung fehlt ein Teil der stratigraphischen Abfolge. Wegen der Art der Trennung der geologischen Horizonte an einer Abschiebung, spricht man auch von **Dehnungsverwerfungen** (*extensional faults*).



Rampen mit Extension sollte man als **Abscherung** bezeichnen. Eine Abschiebung, die weniger als  $45^\circ$  einfällt, nennt man manchmal auch **lag** oder **denudation fault**. Ein typischer Abscherhorizont hat keine Wurzeln und folgt einem stratigraphischen Horizont.

### Aufschiebung

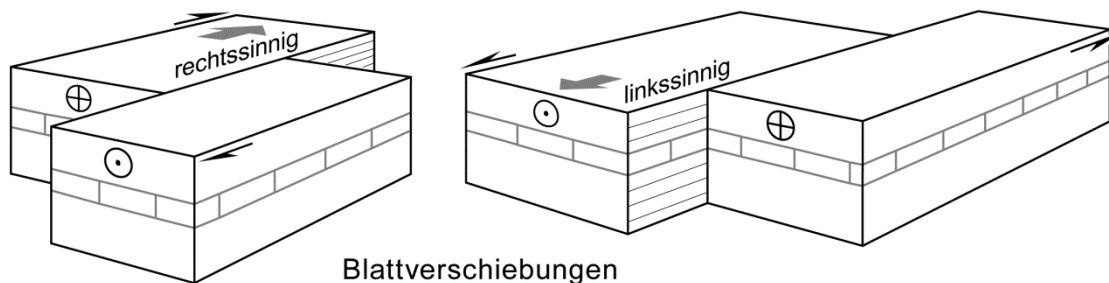
Eine **Aufschiebung** (*reverse fault*) ist eine Steilwinkerverwerfung, wobei sich das Hangende über das Liegende nach oben verschoben hat. Ältere Gesteine werden über jüngere gebracht. Solche Verwerfungen führen in der Vertikalen zur **Wiederholung** (*repetition*) eines geologischen Horizonts und werden gewöhnlich als **Kompressionsverwerfungen** (*compressional fault*) bezeichnet. Eine **Überschiebung** (*thrust fault*) ist eine flach einfallende Aufschiebung entlang welcher das Hangende **Decken** (*thrust-sheets, nappes*) von allochthonen Gesteinen bildet, die auf autochthonem oder parautochthonem Liegendem platzgenommen haben.



Meistens klettern die Überschiebungen durch eine bestimmte stratigraphische Abfolge zur Erdoberfläche in Richtung des tektonischen Transportes.

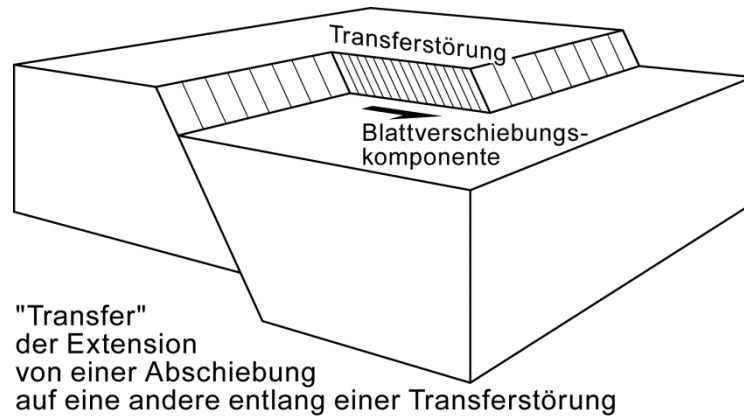
### Blattverschiebungen

**Blattverschiebungen** (*strike slip fault*) haben gewöhnlich sehr steile oder vertikale Fallwinkel und die horizontale relative Bewegung zwischen benachbarten Blöcken ist parallel zum Streichen der Verwerfungsfläche. Grosse Blattverschiebungen werden auch als **transcurrent faults**, **tear faults** oder **wrench faults** bezeichnet. Die Richtung der streichenden Verschiebung auf einer Verwerfung wird mit den Ausdrücken **linkssinnig** (*sinistral*) und **rechtssinnig** (*dextral*) gekennzeichnet. Eine Verwerfung ist linkssinnig, wenn der Beobachter, der auf einem Verwerfungsblock steht, in die Richtung des Gegenblockes blickt und eine **scheinbare Verschiebung** (*apparent displacement*) des gegenüberliegenden Verwerfungsblockes nach links feststellt. Wenn im Gegensatz die Verschiebung nach rechts verläuft, ist die Verwerfung rechtssinnig.

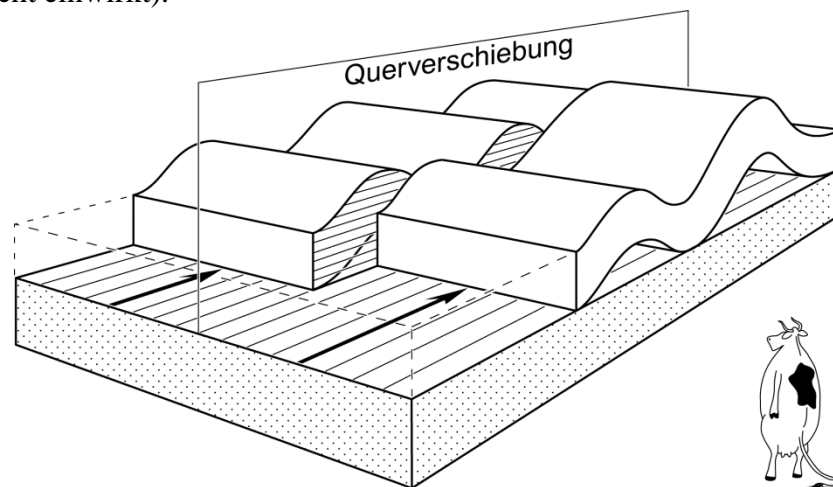


Eine **Transferverwerfung** (*transfer fault*) ist eine Blattverschiebung, welche die Versätze zwischen zwei ähnlich orientierten Verwerfungssegmenten (z.B. zwei Abschiebungen) überträgt. Sie endet auf diesen zwei anderen Strukturen. Transferverwerfungen sind normalerweise auf das Hangende von abgetrennten Systemen begrenzt (d.h. das Grundgebirge unter einem Décollement oder Abscherhorizont der nicht mit einbezogen wurde) und enden, wo sie die verbundenen Verwerfungen anschliessen. Transfer-Verwerfungen (oder -Zonen) sind laterale Rampen, die häufig unterschiedliche Bewegung oder Verformung in aneinander grenzenden Blöcken

(unterschiedliche Beträge von Verkürzung oder von Extension auf beiden Seiten) erklären. Wenn die Überschiebungen oder Abschiebungen in einem grossen Winkel zum Versatz streichen, sind die Transferverwerfungen, welche die beiden Verwerfungen verbinden nahezu parallel zur Bewegungsrichtung. Folglich haben Transferverwerfungen normalerweise Gleitkomponenten, die entlang des Streichens variieren, wenn sich der Versatz entlang der Transfer-Zone ändert.



Eine **Querverschiebung** (*tear-fault*) ist eine Blattverschiebung, die quer zum Streichen eines Kompressions- oder Extensionssystems, im Hangendblock von flach einfallenden Abscherhorizonten, läuft. Die Querverschiebung nimmt den unterschiedlichen Versatz zwischen zwei Segmenten des Systems auf. Solche Verwerfungen sind normalerweise auf das allochthone Hangende von Abschiebungs- und Überschiebungssystemen begrenzt (d.h. sie haben auf das Grundgebirge nicht einwirkt).



### Transformstörung

Eine **Transformverwerfung** (*transform fault*) ist eine Blattverschiebung, die an Plattengrenzen liegt. Es gibt drei Arten:

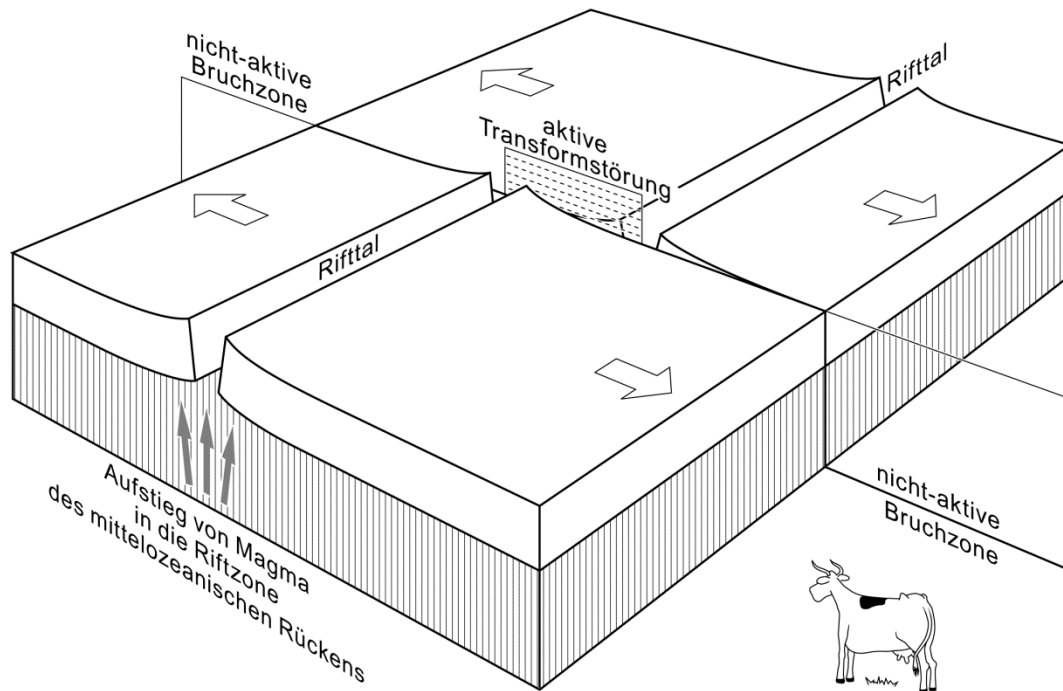
Rücken-Rücken Transformverwerfungen, die zwei Segmente einer konstruktiven Plattengrenze verbinden.

Rinnen-Rinnen Transformverwerfungen, die zwei Segmente einer destruktiven Plattengrenze verbinden.

Rücken-Rinnen Transformverwerfungen, die eine konstruktive Plattengrenze und eine destruktive Plattengrenze verbinden.



### Divergierende Plattengrenze mit einer Transformstörung



Rücken-Rücken Transformverwerfungen treten am häufigsten auf. Typische Transformverwerfungen sind Bruchzonen, die normalerweise im nahezu rechten Winkel zum Mittelozeanischen Rücken verlaufen und diesen horizontal versetzen. Sie unterscheiden sich aber von normalen Blattverschiebungen, indem sie eine entgegengesetzte Verschiebung vollführen, als der Versatz der mittelozeanischen Rücken suggeriert. Die Transformverwerfungen sind nur zwischen den Rücken aktiv, über die Rücken hinaus sind sie inaktiv. Sie sind parallel zu Kleinkreisen, deren Zentrum der Rotationspol der jeweiligen Platte ist. Der Versatz an den Verwerfungen ist viel grösser als die Länge des aktiven Segments.

#### Hybride Verwerfung

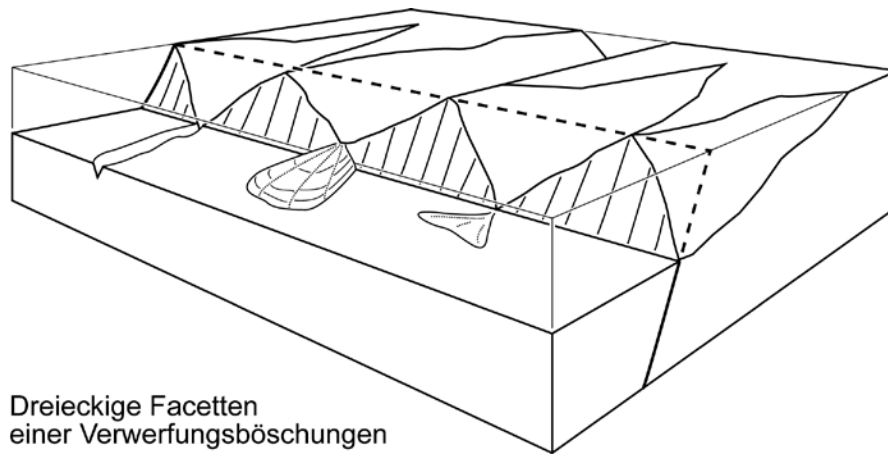
Die Ausdrücke Abschiebung und Überschiebung werden für Verwerfungen, die keine Blattverschiebungskomponente enthalten, angewendet. Die Begriffe werden allerdings auch dort angewendet, wo die fall-parallele (*dip-slip*) Verschiebungskomponente relativ gross gegenüber der Blattverschiebungskomponente (*strike slip*) ist. Wo die fall-parallele und die Blattverschiebungen dieselbe Magnitude haben, wird die Verwerfung als **oblique slip fault** (Verwerfung mit schiefer Verschiebung) bezeichnet.

#### Scherenverwerfung

Ein Verwerfungsblock kann um eine Achse senkrecht zur Verwerfungsfläche einer **Scherenverwerfung** (*scissors fault*) rotieren.

#### Topographische Effekte

Vertikale Verschiebungskomponenten von Verwerfungen an der Erdoberfläche erzeugen lineare topographische **Steilränder** oder **Böschungen** (*scarps*). Verwerfungsböschungen können durch Erosion angeschnitten werden und **dreieckige Facetten** bilden.



Dreieckige Facetten  
einer Verwerfungsböschung

### Versatz / Länge Verhältnis

Die allgemeine elliptische Form von Einzelereignis Bewegungsflächen suggeriert eine Beziehung zwischen einem Verhältnis der maximalen Länge der Verwerfungsfläche (lange Achse der Ellipse) und der maximalen Höhe (kurze Achse der Ellipse). Die Verteilung der Bewegung wird als symmetrisch um ein zentrales Bewegungsmaximum betrachtet. Dieser geometrische Gesichtspunkt hat zu mechanischen Modellen geführt, die auf der Annahme bestehen das Gesteine homogene elastische Materialien sind. Diese Modelle verbinden den maximalen Versatz ( $D_{\max}$ ) am Mittelpunkt der Verwerfung mit der Länge ( $L$ ) der Verwerfung.

Der allgemeine Ausdruck hierfür ist:

$$\frac{D_{\max}}{L} = \frac{2(1-\nu^2)}{E} (\sigma_d - C\sigma_y)$$

Wobei:  $\sigma_d$  die Antriebsscherspannung ist (d.h. die Scherspannung, die zu Coulomb Reibungsgleiten führt),

$\sigma_y$  die Festigkeit des intakten Gesteins an der Spitze der Verwerfung ist, und

$C$  ist eine Variable oder eine Funktion, die spezifiziert, wie die theoretische Spannungseigenheit an der Verwerfungsspitze entfernt wird ( $C = 1/\pi$  in den linearen Versatzmodellen).

$E$  und  $\nu$  sind das Young'sche Verhältnis und das Poisson Verhältnis des Gesteins.

Die oben aufgeführte allgemeine Gleichung zeigt, dass das maximale Verhältnis Versatz/Länge von Verwerfungen, drei Eigenschaften des Umgebungsgesteins widerspiegelt: seinen Schermodulus, sein elastisches Verformungslimit und seine Antriebsscherspannung. Typische Verhältnisse für isolierte, kleine Abschiebungen in sedimentären Gesteinen reichen von 0.002 bis 0.04, mit einem Durchschnitt von 0.01. Für Blattverschiebungen in Turbiditen wurden Verhältnisse von 0.4 bis 0.004 und einem Durchschnitt von 0.02 berichtet. Lithologische Veränderungen könnten die Spannweite der Werte erklären, wobei schwächere Gesteine höhere Verformungsgradienten an den Spitzen der Verwerfungen erreichen und demzufolge ein höheres  $D_{\max}/L$  Verhältnis aufzeigen als stärkere Gesteine.

3-dimensionale seismische Daten zeigen an, dass das Verhältnis zwischen Verwerfungslänge und Größe des Verschiebungsbetrages nur über einen begrenzten Bereich schwankt. Dieses fast konstante Verhältnis Versetzung  $D/L$  Länge  $L$  ist abhängig vom tektonischen Milieu:

- \*  $D/L = 12-40$ : Mehrere Bruchscharenssysteme; die Verwerfungen grenzen häufig aneinander.
- \*  $D/L = 25-75$ : Ein dominierendes Bruchscharensystem; Ab- und Überschiebungen haben eine begrenzte Blattverschiebungskomponente.
- \*  $D/L = 50-150$ : Grosse Blattverschiebungskomponente. Auch für oberflächennahe Verwerfungen in den deltaischen (*growth-fault*) Systemen.

Systematisch kleinere maximale Verschiebungsbeträge für Ab- und Aufschiebungen auf dem Mars (durch einen Faktor von ca. 5) und dem Merkur hängen mit der verringerten Schwerkraft auf diesen Planeten im Verhältnis zur Erde zusammen.

Aktivität von Verwerfungen

Obgleich jede Verwerfung sich bewegt hat und reaktiviert werden kann, haben Geologen eine qualitative Klassifikation von drei Kategorien entwickelt, um seismische Gefahren abzuschätzen.

- eine aktive Verwerfung hat sich während der letzten 10 000 Jahre bewegt.
- eine möglicherweise aktive Verwerfung hat sich während des Quartärs bewegt.
- eine inaktive Verwerfungen hat sich vor dem Quartär bewegt.

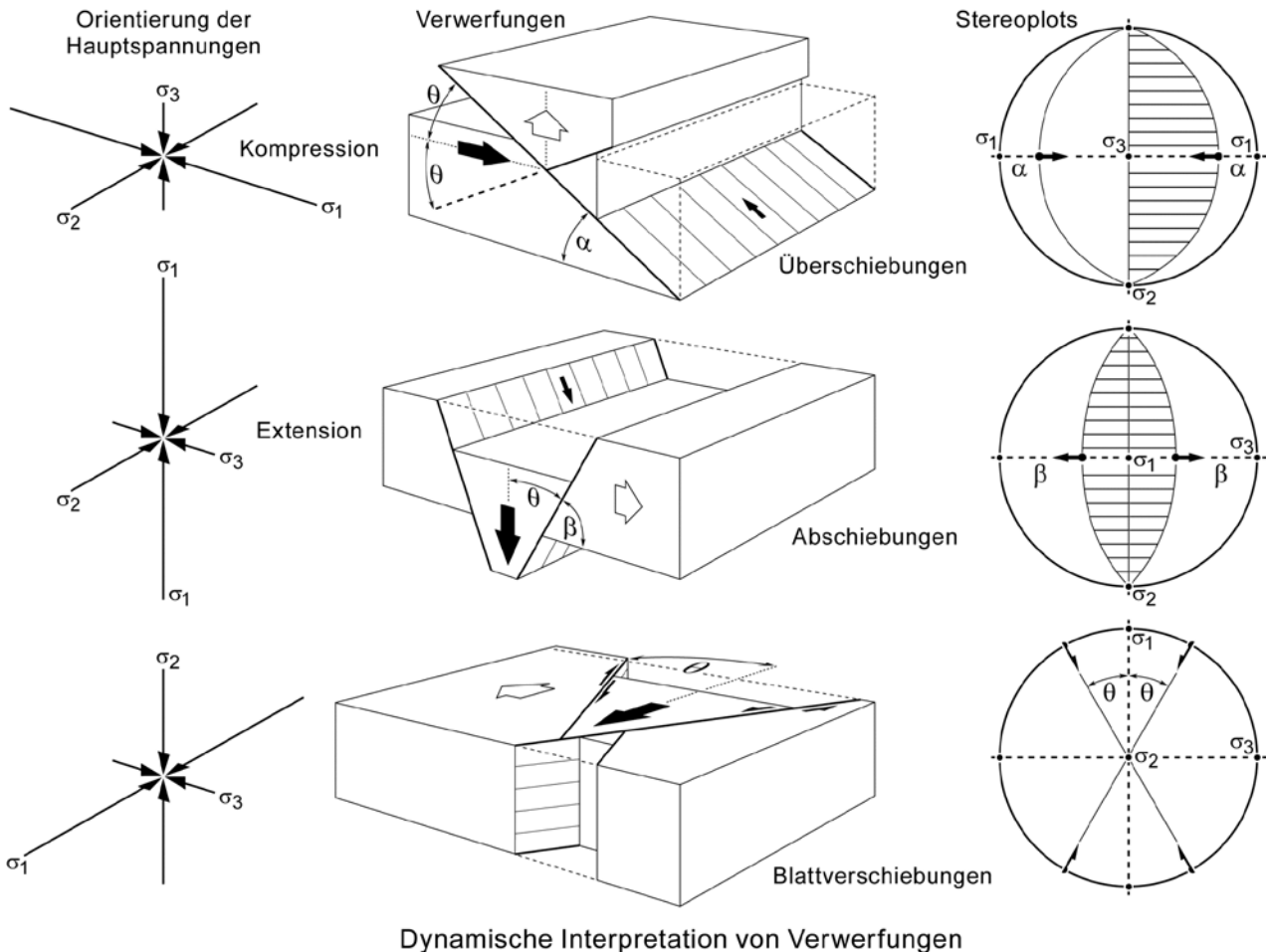
Jedoch ist es schwierig ohne historische Aufzeichnungen von Erdbeben zu prüfen, ob eine Verwerfung aktiv ist. Jede Verwerfung ist eine Schwächezone, die zur Reaktivierung "fähig" ist.

**Beziehungen zwischen Verwerfungen**

Verwerfungen sind selten isoliert. Kleinere **Nebenverwerfungen** (*subsidiary faults*) geringerer Ausdehnung begleiten oft die **Hauptverwerfung** (*master fault*). Man trifft sie gewöhnlich in Gruppen an, die innerhalb einer Bruchzone oftmals dieselbe Art der Verschiebung anzeigen, parallel sind und geologische Körper in sogenannte **Bruchflügel** oder **Verwerfungsblöcke** (*blocks*) gliedern.

Konjugierte Verwerfungen

Ein geologischer Körper kann durch zwei **konjugierte Verwerfungen** (*conjugate faults*) begrenzt sein. Ein konjugiertes Bruchsystem ist dadurch charakterisiert, dass Verwerfungen der gleichen Art, die während der gleichen Deformationsphase gebildet wurden, in zwei symmetrischen Scharen mit parallelem Streichen, aber entgegengesetztem Einfallen und gegenüberliegendem oder gegenseitigen Bewegungssinn auftreten.



Triaxiale Experimente (die drei Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  haben Magnituden ungleich Null) zeigen, dass sich Verwerfungen zum jeweils angelegten Spannungsfeld orientiert ausbilden.

- Konjugierte Verwerfungen kreuzen sich auf einer Linie die parallel zur intermediären Hauptspannungsachse  $\sigma_2$  verläuft.
- Der spitze Winkel zwischen den konjugierten Verwerfungen wird von der grössten Hauptspannungsachse  $\sigma_1$  halbiert, der stumpfe Winkel von  $\sigma_3$ .
- Strömungen, welche die Bewegungsrichtung abbilden, liegen per Definition parallel zur Schnittlinie zwischen der Verwerfungsfläche und der  $(\sigma_1, \sigma_3)$  Ebene.
- Das Material wird parallel zu  $\sigma_1$  verkürzt und parallel zu  $\sigma_3$  gestreckt.

Diese Beobachtungen sind die Grundlage für eine dynamische Interpretation der Verwerfungssysteme. Zusätzlich hat Anderson hervorgehoben, dass die Erdoberfläche eine freie Oberfläche mit einer Flüssigkeit (Luft) ist und Flüssigkeiten nicht imstande sind, Scherspannung zu übertragen (dies ist eine physikalische Definition von Flüssigkeiten). Folglich ist die Erdoberfläche eine Hauptspannungsfläche (erinnern sich Sie daran, dass eine Hauptspannung per Definition, senkrecht zur einer Fläche steht die keine Scherfläche ist. Wenn angenommen wird, dass die Erdoberfläche eine Horizontale ist (was in Regionen mit niedrigem Relief fast zutreffend ist), dann ist einer der drei Hauptspannung fast vertikal zur Oberfläche. Welche Art von konjugierten Verwerfungen sich in der Nähe der Oberfläche entwickelt, hängt davon ab welche von den drei Hauptspannungen fast vertikal ist;

$\sigma_1$  vertikal: Abschiebungen, die ca.  $60^\circ$  einfallen.

$\sigma_2$  vertikal: Vertikale Blattverschiebungen.

$\sigma_3$  vertikal: Abschiebungen, die ca.  $30^\circ$  einfallen.

Diese Interpretation bezieht mit ein, dass die vertikale Spannung der lithostatische Druck ist und dass regionale Spannungsveränderungen an den Änderungen der Grösse der horizontalen Spannung im Verhältnis zu der vertikalen Gravitationslast liegen. Es gibt drei Möglichkeiten:

- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen um verschiedene Grösse ab.
- Die beiden horizontalen Hauptspannungen nehmen um verschiedene Grösse zu.
- Eine horizontale Hauptspannung erhöht sich, während die andere horizontale Hauptspannung sich verringert.

### Übung

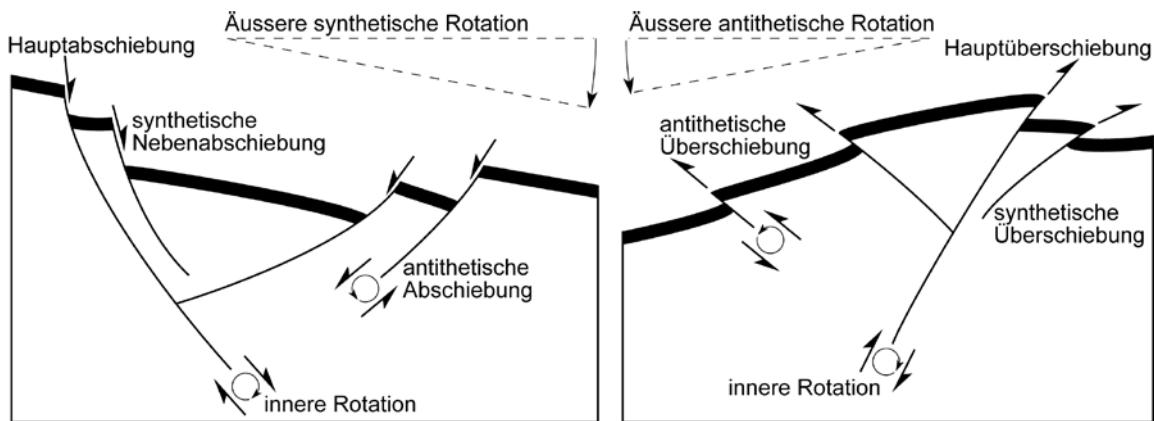
*Nehmen Sie an, dass eine der Hauptspannungen die Gravitationslast ist. Zeichnen Sie drei Mohr-Diagramme, die den drei Anderson „Standard Spannungszuständen“ entsprechen, mit dem gleichen Coulomb-Bruchkriterium und der gleichen vertikalen Spannung. Kommentieren Sie die Abschiebung, Überschiebung und Blattverschiebung hinsichtlich der Differentialspannungen.*

Diese Formulierung erklärt viele Störungssysteme, aber flache Abschiebungen und steile Aufschiebungen sind identifizierte natürliche Fälle, die nicht an die Anderson Regel halten. Erklärungen hierfür können der Einfluss der Anisotropie oder schon bestehende Brüche in natürlichen Gesteinen sein. Diese beeinflussen die Orientierung der Verwerfung und auch möglicherweise die Verformung entlang der  $\sigma_2$ -Richtung. Andere Erklärungen beziehen Rotation der Verwerfungsflächen in Richtung unkonventionelle Orientierung mit ein.

### Synthetische und antithetische Verwerfungen

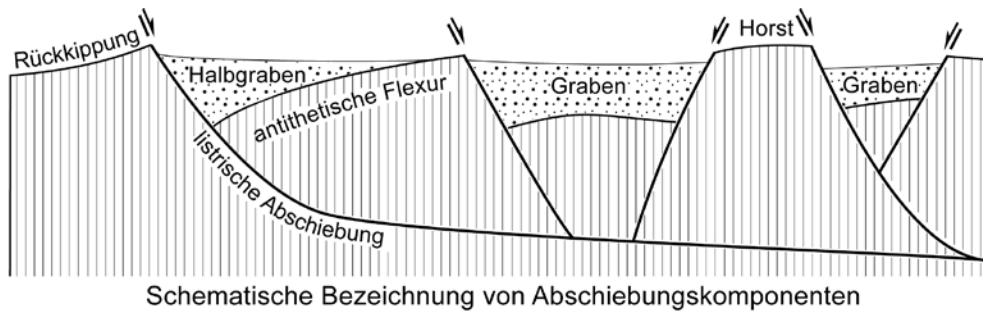
**Synthetische Verwerfungen** (*synthetic faults*) sind parallel zur Hauptverwerfung und haben dieselbe Relativbewegung. Die kleineren genetisch in Verbindung stehenden konjugierten

Verwerfungen, welche in die entgegengesetzte Richtung zur Hauptstörung einfallen, nennt man **antithetisch** (*antithetic*).



Abschiebungen

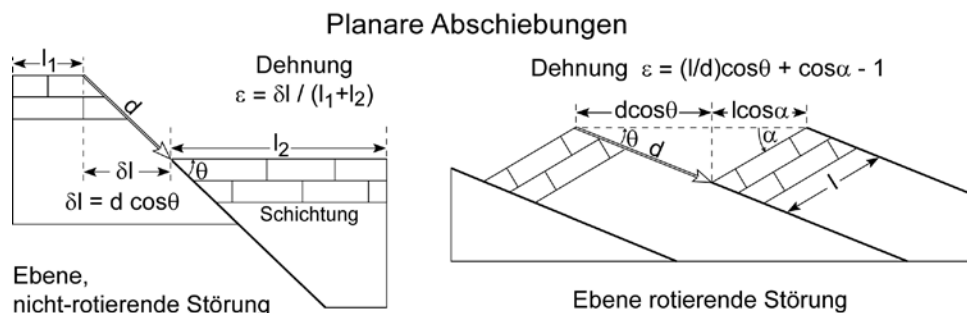
Einen nach unten versetzten Block, welcher durch konjugierte Abschiebungen, die gegeneinander einfallen, begrenzt ist, nennt man **Graben** (*graben*). Umgekehrt wird ein nach oben verschobener Block, der durch nach aussen einfallenden Abschiebungen begrenzt ist, als **Horst** (*horst*) bezeichnet. Gräben, die sich über grosse Breiten erstrecken, heissen **Rifts** (*rifts*). Ein Graben, der nur durch ein Set von Abschiebungsflächen begrenzt wird, hat einen dreieckigen Querschnitt und man bezeichnet ihn als **Halbgraben** (*half-graben*).



In idealen Graben-und-Horstsystemen sind die Wachstumsraten der Verwerfungen gleich, damit die Verwerfungsblöcke nicht rotieren und der Graben während des ganzen Extensionsereignisses symmetrisch bleibt. In den natürlichen Verwerfungssystemen jedoch wachsen die Verwerfungen mit unterschiedlicher Rate und verursachen folglich asymmetrische Graben und Blockrotation. Tatsächlich gehen Verwerfungen häufig mit Rotationen einher. Es gibt zwei Arten von Abschiebungen bei denen Rotationen wichtig sind: Planare und listrische Abschiebungen.

**Planare Abschiebungen**

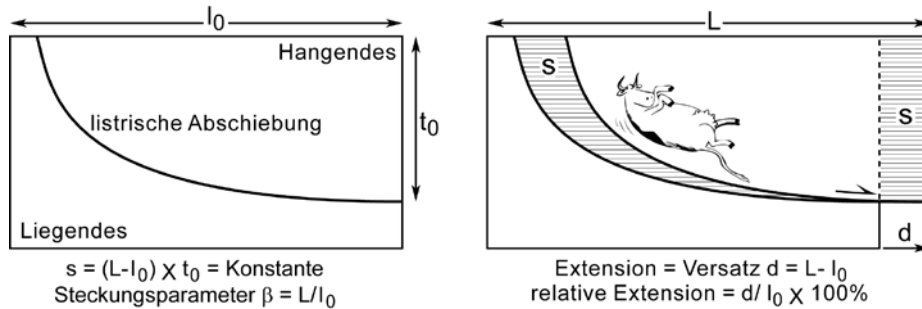
Planare, rotationale Abschiebungen rotieren über einen basalen Abscherhorizont oder über einen spröde-duktilen Übergang. Sie trennen gegeneinander versetzte und gekippte Blöcke, ohne interne Deformation. Ebene rotierende Verwerfungen werden als **Domino-** oder **büchergestellartige Verwerfungen** bezeichnet, weil die Blöcke und mit ihnen auch die Verwerfungsebenen gleichzeitig rotieren.



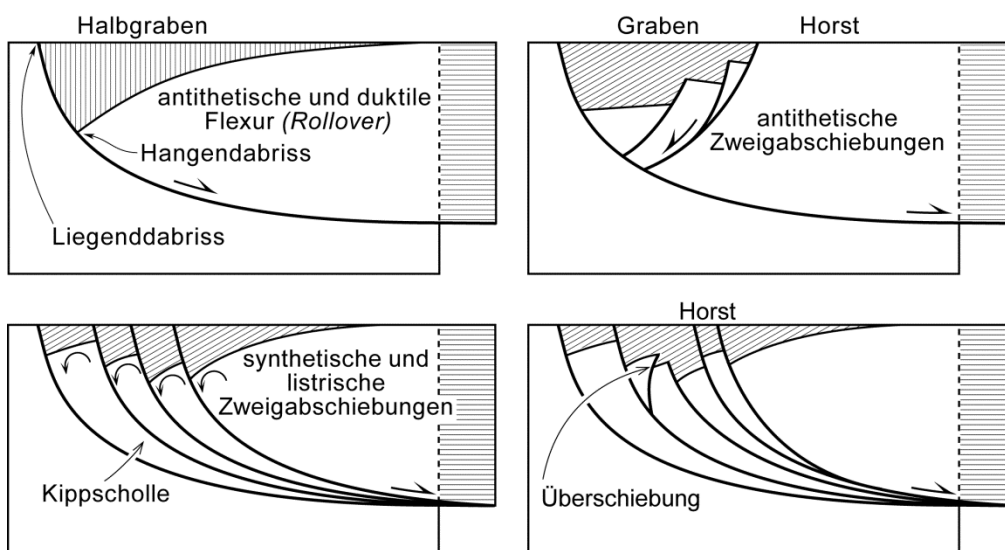
Mit einem verknüpften Verwerfungssystem enden alle Verwerfungen an einer bestimmten Tiefe in einem Abscherhorizont am duktilen Übergang zwischen der oberen und der unteren Kruste. Jeder neue Bruchblock hat seinen eigenen Halbgraben. Jede Verwerfung muss gleichen Versatz und gleiche Verkippung haben, ansonsten entsteht an der Unterseite des Systems ein Platzproblem (Öffnung von Lücken). Planare, rotationale Abschiebungen und Blöcke grenzen im Allgemeinen an Transfer-, Scherenverwerfungen.

**Listrische Abschiebungen**

Häufig sind die Abschiebungen, insbesondere die Hauptabschiebungen, listrisch (nach oben hin konkave Verwerfung). Die Abschiebung ist meist sehr steil nahe der Oberfläche und flacht zur Tiefe hin ab.



Falls die Verwerfungsblöcke spröde und starr sind, führt dies zu einem Platzproblem. Denn wenn die nebeneinander liegenden Blöcke versetzt werden, können Blöcke nicht überall aneinander bleiben, es entstehen zwischen den Hangenden und den Liegenden Löcher. Die Löcher können mit Gesteinsbruchstücken der Verwerfungsfläche aufgefüllt werden, oder aus zirkulierenden Wässern scheiden sich darin Mineralien aus. Um die geometrische Kompatibilität beizubehalten, müssen die Schichten des Hangenden in Richtung zur Verwerfung rotieren und einfallen. So führt die Lücke zum Kollaps oder zur Rotation des Hangenden gegen die Verwerfung, was Blockrotationen und Ausgleich der Flexur durch antithetische Verwerfungen bewirkt. Kollaps kann durch antithetische und/oder synthetische Abschiebungen, die sich an der flachen Sohlhauptverwerfung anschließen, aufgenommen werden. Die Schichten werden zur Verwerfung hin verkipppt. Wichtig ist, dass die Dreiecksform eines Halbgrabens, das heisst die Schrägstellung der Schichten des Hangenden, sowohl von der Geometrie der listrischen Abschiebung, als auch vom Verschiebungsbetrag abhängt.



Kollapsverformung des Hangenden einer listrischen Hauptabschiebung, um die Lücke zwischen dem Hangenden und dem Liegenden zu füllen.

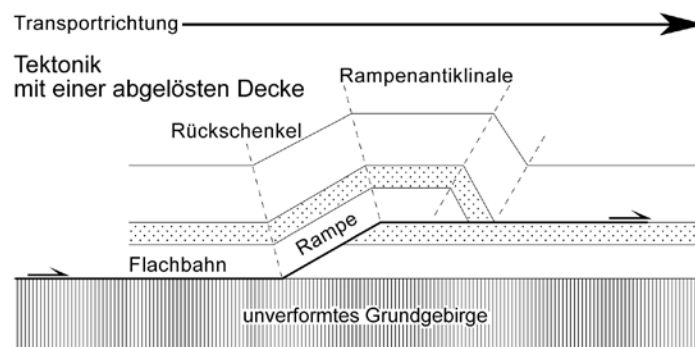
## Überschiebung

Zwei Arten werden allgemein benutzt, um Überschiebungstektonik zu beschreiben: **Deckschicht-Tektonik** (*thin-skinned tectonics*) und **dickhäutige-Tektonik** (*thick-skin tectonics*).

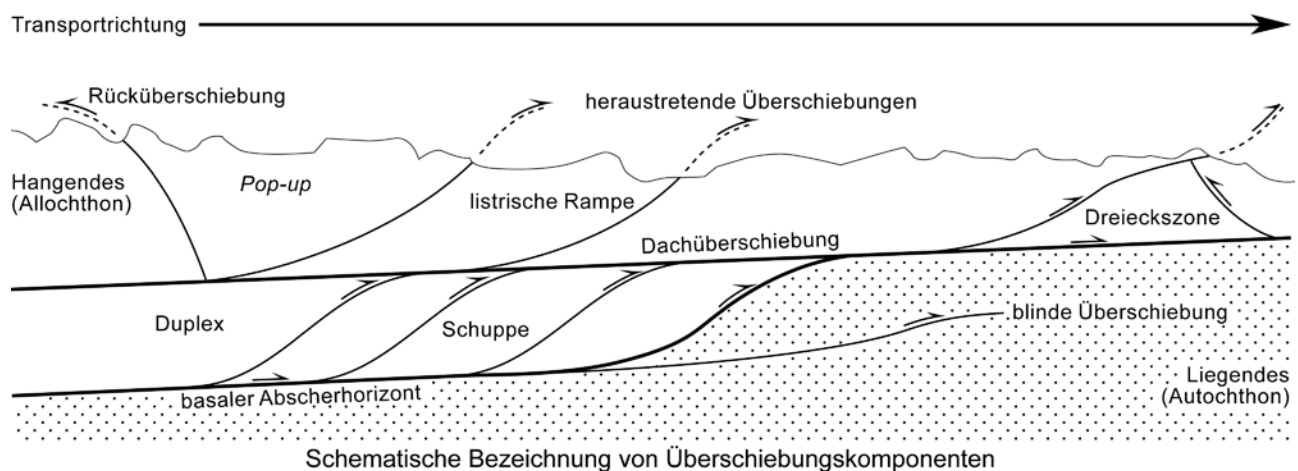
Zwei Arten werden allgemein benutzt, um Überschiebungstektonik zu beschreiben: **Deckschicht-Tektonik** (*thin-skinned tectonics*) und **dickhäutige-Tektonik** (*thick-skin tectonics*). Sie beziehen sich darauf wie viel das Grundgebirge des Überschiebungssystems mit einbezogen ist.

### Tektonik mit einer abgelösten Decke (Deckschicht-Tektonik)

In vielen Vorland Falten- und Überschiebungsgürteln ist gewöhnlich die sedimentäre Abdeckung vom Grundgebirge entlang von Verwerfungsflächen mit einer Rampe-Flachbahn Geometrie abgetrennt. Die **Sohlflächen** (*sole thrusts*) bleiben über dem starken, kristallinen Grundgebirge erhalten, bei dem das Grundgebirge durch die Überschiebungen unverformt bleibt. Dieser Deformationsstil ist als Deckschicht-Tektonik bekannt. Dann spielt die Schichtung den kontrollierenden Faktor um die stufenartigen, flachen Rampensysteme auszubilden.



Deckschicht-Tektonik deutet auf grosse horizontale Bewegungen hin, wobei die stratigraphische Abfolge über dem unteren, flachen Décollement mehrmals angehäuft werden kann. So dass eine Decke auf die nächste folgt. Die Decken sind im Allgemeinen dünn im Vergleich zu ihrer seitlichen Ausdehnung. Neue Überschiebungen können sich in der Reihenfolge entweder in der Richtung des Transportes (bekannt als **prograding**) oder entgegengesetzt dazu (rückwärts) ausbilden. Wo spätere, jüngere Überschiebungen im Liegenden einer älteren entstehen, werden die ältere Decken im Hangendem durch die jüngeren, tiefer gelegene Decke **huckepack-artig** (*piggyback*) vorwärts getragen. Im Gegensatz dazu entsteht eine **overstep** (Überschneidungs-) Abfolge, wenn die jüngeren Überschiebungen rückwärts migrieren.



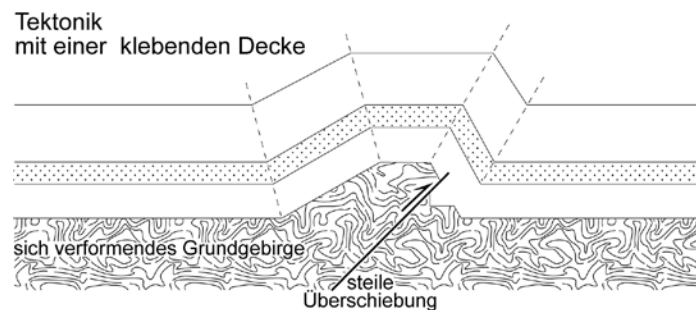
Die mehrfache Entstehung von Überschiebungsabfolgen führt oft zu einer Stapelung von Überschiebungsdecken, die durch subparallele Überschiebungen getrennt sind. Es entsteht eine **Schuppenzone** (*imbricate zone*). Wenn die Schuppenzone nach oben und unten hin durch

Hauptüberschiebungs- oder Décollement-Flächen begrenzt wird spricht man von einem **Duplex** (*duplex*). Die einzelnen Duplexe innerhalb der Duplexstruktur werden als Schuppen (*horses*) bezeichnet, die im Profil gewöhnlich linsenförmig sind. Eine typische Duplexstruktur besteht daher aus einem flachliegenden **roof thrust** (Dachüberschiebung) und einer Sohlfläche, die die einzelnen aufeinander gestapelten Schuppen begrenzt.

Untergeordnete Überschiebungen mit entgegengesetztem Versatz zur Hauptüberschiebung werden **Rücküberschiebungen** (*backthrusts*) genannt. Strukturen mit einem herausgehobenen Block, der sich zwischen einer Überschiebung und einer Rücküberschiebung befindet, werden als **Pop-up Strukturen** (*pop-up structure*) bezeichnet. Wenn eine Rücküberschiebung eine ältere Überschiebung abschneidet, entsteht eine **Dreieckszone** (*triangle zone*).

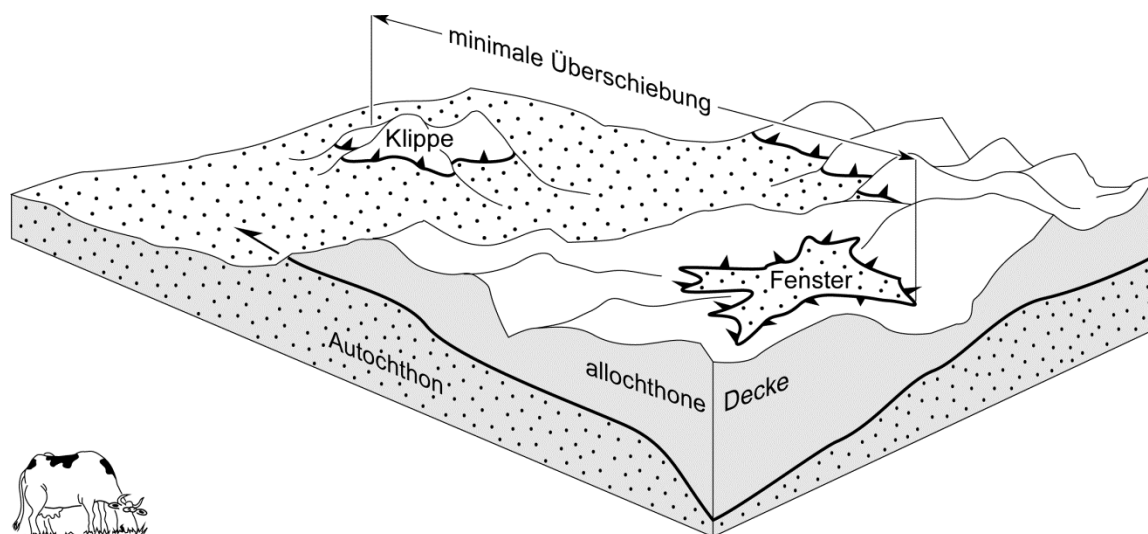
### **Tektonik mit einer klebenden Decke (Dickhäutige Tektonik)**

In metamorphen Gebieten sind Überschiebungen häufig mit intensiver und verteilter duktiler Deformation assoziiert. Die Stufen-, Flachbahnen- und Rampengeometrie wird nicht berücksichtigt, obgleich Überschiebungen dazu neigen, Flächen rheologischen Kontrasts zu folgen aber dabei das Grundgebirge mit einbeziehen. Die Hauptüberschiebungen erstrecken sich steil bis zum Grundgebirge. Diese Form wird **dickhäutig** (*thick-skin*) genannt.



### **Erodierte Überschiebungen**

Ein (tektonisches) **Fenster** (*window*) ist ein durch die Erosion entstandener Aufschluss, wo Gesteine der nächst tieferen Einheit, das heißt unterhalb einer Überschiebung, sichtbar werden. Der Aufschluss ist völlig umgeben von der darüber liegenden Überschiebungsmasse. Eine **Klippe** (*klippe*) ist ein isolierter, von der Erosion übriggebliebener Rest der Überschiebungsdecke, der ganz von Gesteinen des Liegenden umgeben ist.



### **Gravitationsgetriebene Überschiebungen**

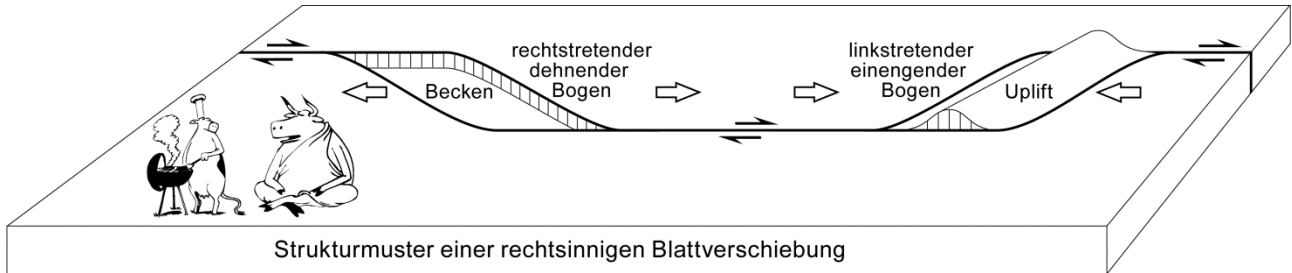
Ein Teil der Serie aufgrund gravitationsgetriebenem **Kollaps** (*collapse*) ist vom Gipfel der Antiklinale weggerutscht. **Gleitdecken** (*slip sheet*) werden gebildet, wenn ein zusammenhängender



Teil einer Serie infolge von gravitationsgetriebenem Kollaps von einem Antiklinalenscheitel auf eine erodierte Fläche der angrenzenden Synklinale geglitten ist.

Blattverschiebung

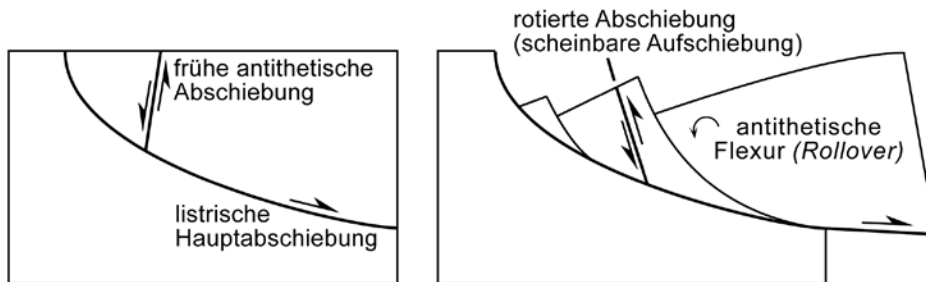
Blattverschiebungen sind im Allgemeinen vertikal und entwickeln sich ca. 30° zur horizontalen Kompressionsrichtung. Sie entwickeln häufig Flächen mit **rechtstretenden** (*right-stepping*) und **linkstretenden** (*left-stepping*) Verwerfungen (von der oberen zur unteren Verwerfung gehend). Während rechtstretende Verwerfungen eine Extensionszone bilden, erzeugen die linkstretenden Verwerfungen eine Konvergenzzone und umgekehrt, entsprechend der Bewegungsrichtung der Verwerfung.



Nebenverwerfungen von gebogenen Hauptverwerfungen

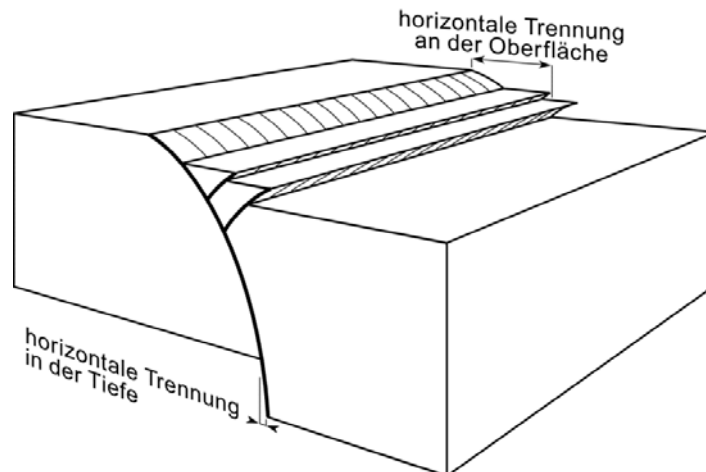
Normalerweise gehören Nebenverwerfungen zur gleichen Kategorie wie die Hauptverwerfung. Dies gilt aber nicht bei gebogenen Hauptverwerfung, was in einer komplizierten Verformung des Hangenden durch die Entwicklung von Akkomodationsverwerfungen resultiert:

- Rotation des Hangenden in einer listrischen Abschiebung kann eine ehemalige antithetische Abschiebung in eine scheinbare Aufschiebung ändern.



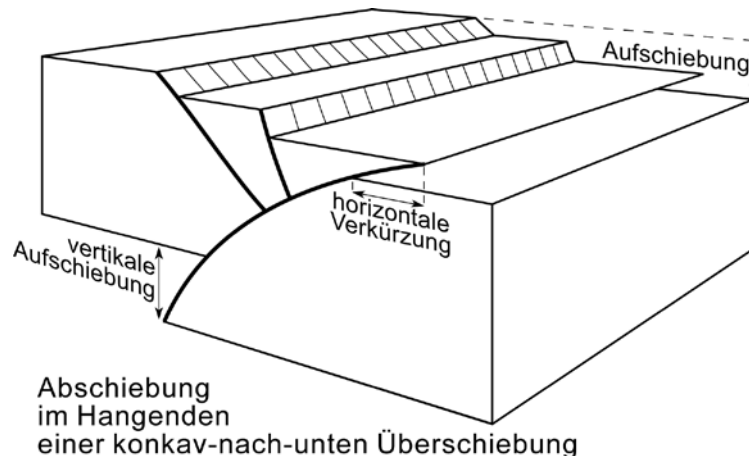
Rückrotation einer antithetischen Zweigabschiebung zu einer scheinbaren Aufschiebung im Hangenden einer listrischen Hauptabschiebung

- Aufschiebungen können sich im Hangenden einer nach-oben-konvex Abschiebung bilden.



Aufschiebungen im Hangenden einer konkav-nach-unten gewölbten Abschiebung

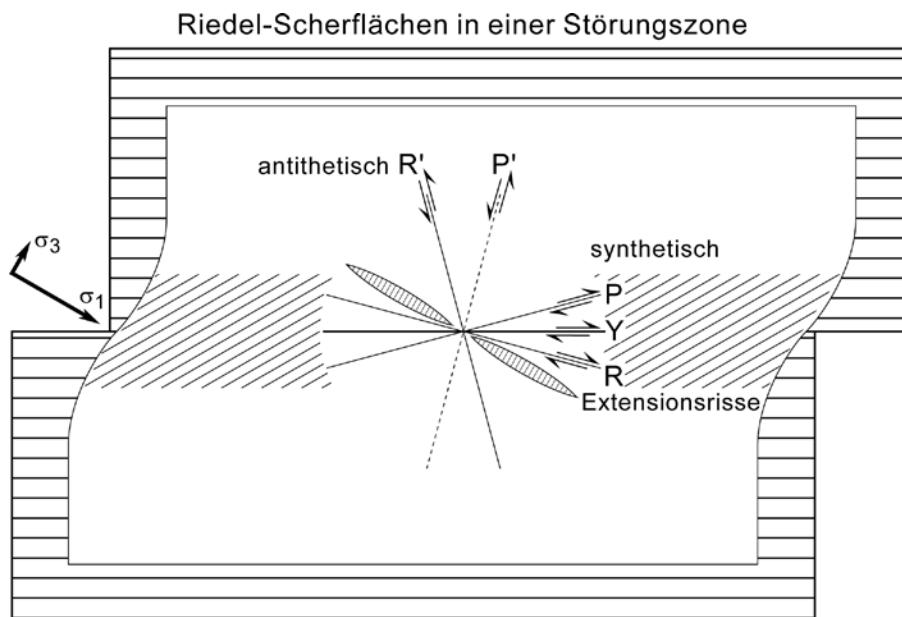
- Aufschiebungen können sich in gekippten Schichten bilden um die schichtparallele Ausdehnung, infolge der grossräumigen Abschiebung, aufzunehmen.



- Abschiebungen können sich im Hangenden einer nach-oben-konvex Aufschiebung bilden.

### Nebenbrüche = Riedelbrüche

Kleinere **Riedelbrüche** (*Riedel shears*) pflanzen sich meist nur in der Nähe von der Hauptverwerfung fort. Diese Bezeichnung wird auch bei Betrachtungen im grossen Massstab von Verwerfungsfeldern gebraucht. Riedelbrüche bilden ein Netzwerk, das gewöhnlich während der frühen Stadien der Bruchbildung entstanden ist. Sie bilden eine systematische Anordnung, die für eine grosse Vielfalt von Materialien und über einen breiten Massstabbereich selbständig zu sein scheint.

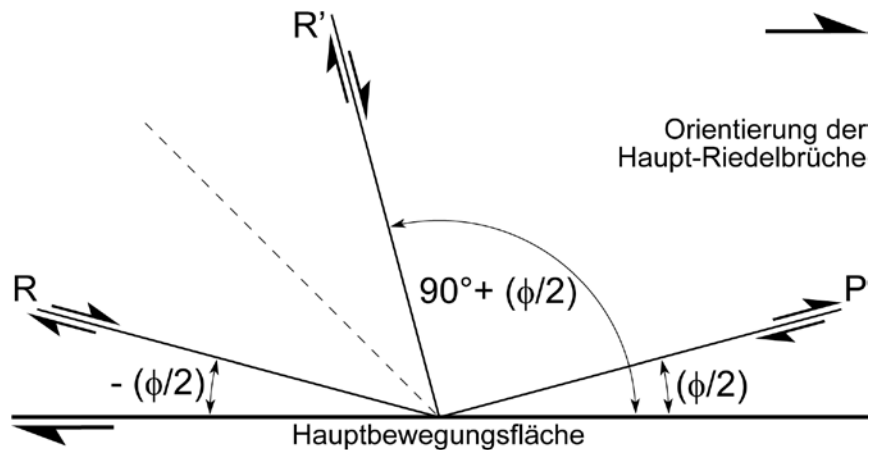


Die grundlegende Geometrie besteht aus konjugierten **R** und **R'**-Brüche so, dass die Winkelhalbierende des spitzen Winkels die Richtung der maximalen Kompressionsspannung ist.

- **R**-Riedelbrüche entstehen unter einem kleinen Winkel (typisch sind 10-20°) zur Hauptverwerfung (oft in einer *en-échelon* Anordnung). Sie sind synthetisch zur Hauptverwerfung. *En-échelon* beschreibt das ausgerichtete Muster einer Reihe paralleler, kurzer Brüche, die wie Sprossen einer Strickleiter, die in Perspektive gesehen wird, angeordnet sind. Die grösste Hauptspannung  $\sigma_1$  liegt während der einfachen Scherung 45° zur Hauptscherfläche. Das Mohr-Coulomb Bruchkriterium sagt voraus, dass die konjugierten Bruchflächen optimal  $\pm(45^\circ - \phi/2)$  zu

$\sigma_1$  geneigt sind, wobei  $\phi$  der Winkel der inneren Reibung des Materials ist. Der spitze Winkel zwischen den Riedelbrüchen und der Hauptverwerfung ist  $-\phi/2$ . Dieser Winkel zeigt in die Richtung der relativen Gleitrichtung entlang der Hauptverwerfung.

- **R'-Brüche** sind antithetische Verwerfungen (d.h. mit Versatz entgegen der Gesamtbewegung), die in einem steilen Winkel [110-120°; d.h.  $45 + \phi/2$ ] zur Hauptverwerfungsebene orientiert sind (konjugiert zu den R(iedel) shears). Sie kommen bevorzugt zwischen zwei parallele R-Brüche vor. R und R'-Brüche schneiden sich in einem spitzen Winkel.



- **P-Brüche** sind synthetische kleinere Verwerfungen, symmetrisch zu den R-Brüche und zur Verwerfungsebene orientiert (mit  $+\phi/2$  zur Verwerfungsebene). P-Brüche verbinden allgemein R-Brüche und neigen dazu bei grossen Bewegungen zu entstehen.

- Wie für R Riedel Scherbrüche kann es ebenso auch **P'-Brüche** konjugiert zu den P-Brüchen geben, sie sind aber von sehr untergeordneter Bedeutung.

- **Y-Brüche** sind synthetische Mikrobrüche, die subparallel zur Hauptverwerfung liegen.

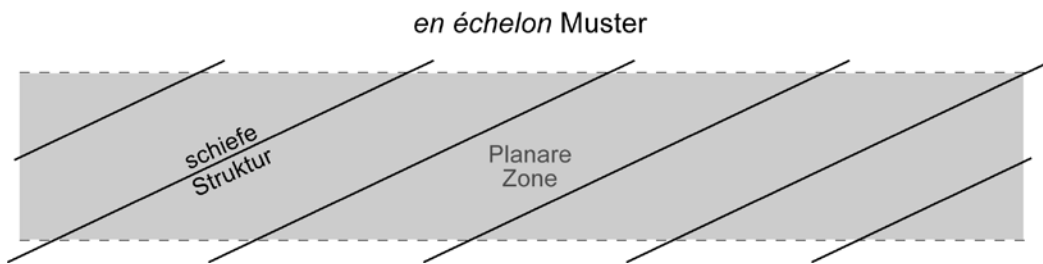
### Verwerfungspopulationen und netzartige Anordnung von Verwerfungen

Die Analyse der Verwerfungs-Populationen hat gezeigt, dass Verwerfungen viele Eigenschaften von **Fraktalen** haben. Ein Fraktal ist ein Objekt, dessen geometrische Eigenschaften (z.B. Form) unabhängig von seiner Grösse ist („selbst-gleichartig“ = *self similar*) oder eine einfache Relation mit seiner Grösse („selbst-ähnlich“ = *self affine*) hat. Diese Eigenschaft bedeutet, dass ein Verwerfungsmuster, das auf Satellitenbildern gesehen wird, dasselbe Verwerfungsmuster wie in einem Aufschluss ist. Dieses bedeutet, dass einige Eigenschaften (z.B. das Länge/Versatz-Verhältnis) relativ unabhängig von der Verwerfungsgrösse sind. Wie auch immer, die Analyse von Verwerfungen mit 3-dimensionalen Daten hat gezeigt, dass im Log-Log Diagramm ein einfaches lineares Verhältnis zwischen Häufigkeit und der Grösse von Verwerfungen besteht. Dieses Verhältnis zwischen Grösse (Länge oder maximale Verschiebung) und Anzahl der Verwerfungen mit einer bestimmten Grösse (wenige grosse Verwerfungen, viele kleine Verwerfungen) kann verwendet werden, um die Dichte von kleinen, sozusagen sub-seismisch (d.h. unterhalb der Auflösung der Seismik), Störungen vorherzusagen.

Es gibt einige wichtige Ausdrücke, die die Anordnung von Verwerfungen in der Karten-Ansicht beschreiben.

#### **En échelon Muster**

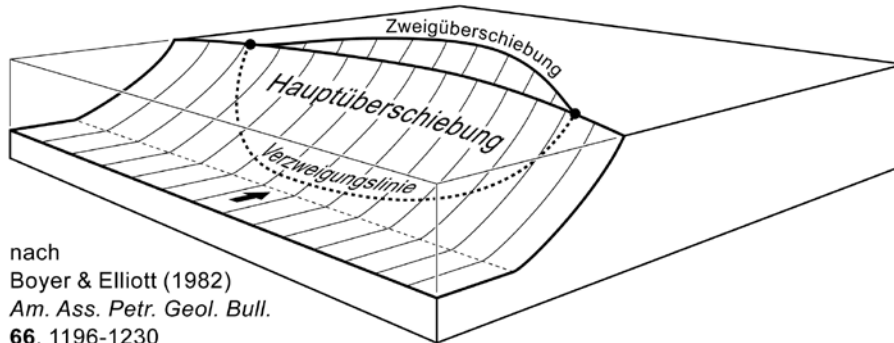
"**En-échelon**" (in **Staffeln**) bedeutet "Treppen-ähnliche Anordnung" und beschreibt eine durchweg überschreitende und überlappende Einregelung von subparallelen, räumlich eng bemessenen Strukturen, die schief zur planaren Zone sind, in der sie auftreten. Solche Muster hängen im Allgemeinen mit möglichen Verwerfungen zusammen.



### Zusammenlaufende Verwerfungen

In Gebieten mit Sprödbrech und in Beschädigungszonen verzweigen sich Verwerfungen in komplexe Anordnungen von kleineren Verwerfungen, die sich in einem spitzen Winkel von der Richtung der Hauptverwerfung wegbiegen.

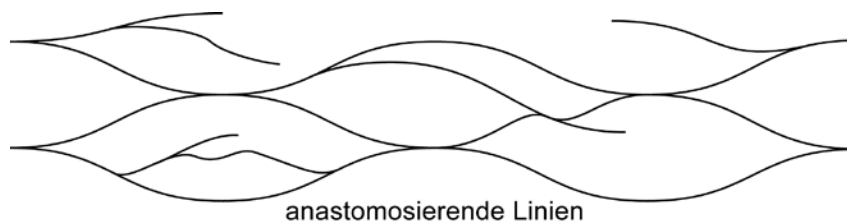
Schuppenzone mit einer Verzweigungslinie und zwei Verzweigungspunkte



Eine **Verzweigungslinie** (*branch line*) ist eine Intersektionslinie, an der sich eine Verwerfung in zwei Verwerfungen desselben Typus aufspaltet. Hinter dieser Linie haben die verzweigten **Zweigverwerfungen** (*splay faults*) die gleiche relative Bewegung wie die Hauptverwerfung. Sie bilden einen **Verwerfungsfächer** (*imbricate fan*), der zu einer Ausbreitung der Verschiebung (und Verformung) auf ein Gesteinsvolumen führt. Alle Verwerfungen finden an der Frontallinie ein Ende, an denen die relative Verschiebung auf null geht und die Deformation im umgebenen Gestein aufgenommen wird. Eine Zweigverwerfung ist ein kleines häufig inaktiviertes Verwerfungssegment oder Zweig, das während dem Verwerfungswachstum (harte Verknüpfung) oder der Ausbreitung (Verzweigung) erstellt wurde.

### Anastomosierendes Muster

Riedel Mikrobrüche können sich auf jeden Massstab verbinden und so ein anastomisierendes Netzwerk von Brüchen in engen Bruchzonen bilden, deren Ränder parallel zur Hauptverwerfung liegen.



**Anastomosierend** (*anastomosing*) beschreibt ein ausbreitendes und wieder zusammenbringendes Netz von aperiodischen Flächen oder Linien, die wie Zopf-Ströme oder Adern verflochten sind.

### Skalierung von Verwerfungsverteilungen

Häufig wird eine Potenzgesetzverteilung angenommen, um die Verwerfungsverteilungen zu beschreiben. In der Praxis könnte die Bedeutung eines einzelnen Potenzgesetzexponenten

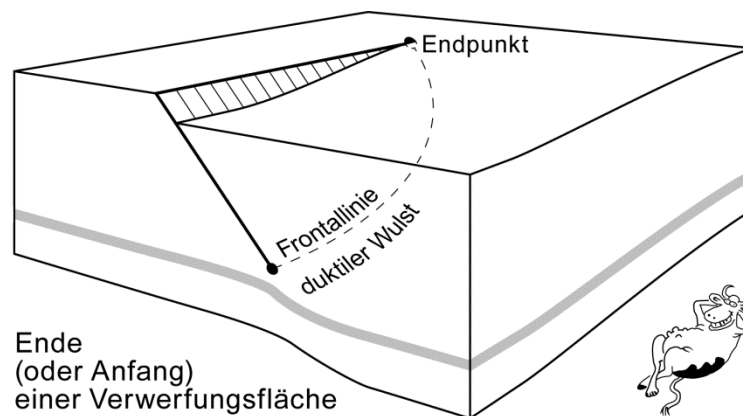
hierarchische Muster in einem komplizierten Bruchsystem aufdecken, das alle Art Brüche mit verschiedenen Massstäben umfasst.

## Anatomie der Verwerfungen

Verwerfungen sind nicht unendlich lang. Sie bestehen aus der Scherfläche (**Störungskern**, bei „dicken“ Verwerfungen wird er gebildet durch anastomosierende Scherbrüche) und einer umhüllenden **Beschädigungszone** (*damage zone*), die eine gewisse Breite umfasst. Diese zwei Elemente enden entweder an anderen Verwerfungen oder sie laufen einfach entlang ihres Streichens aus. Im letzteren Fall vereinen sich die Verwerfungen entweder oder werden durch die andere Verwerfungen abgeschnitten. Resultierend aus dem Wachstum von Verwerfungen und deren Verschmelzung entwickeln sich **Netzwerke von Verwerfungen** (*fault network*).

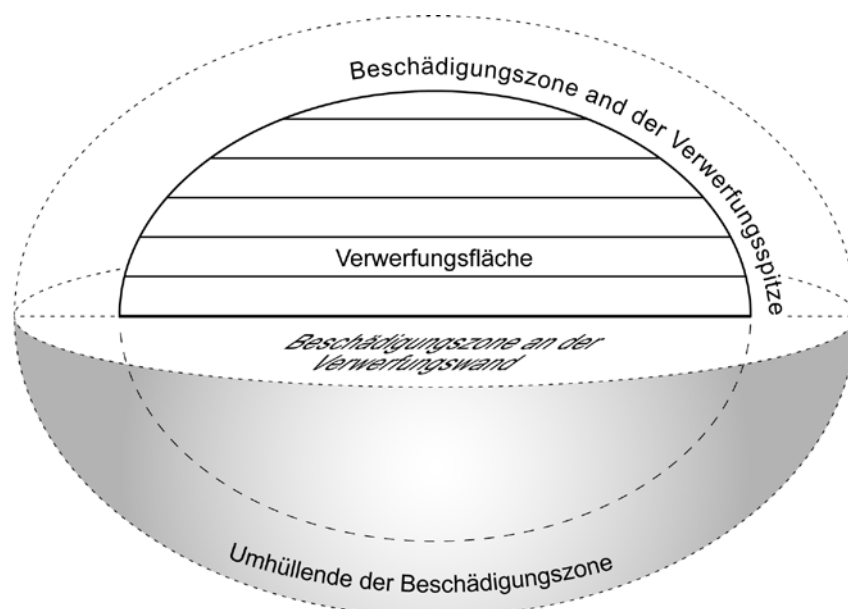
### Frontallinie und Frontalzonen

Einzelne, isolierte Verwerfungen haben ungefähr eine elliptische (geschlossene) Oberfläche, entlang der die meiste Verschiebung stattgefunden hat. Diese elliptische Form verschwindet, wenn die Verwerfung die Erdoberfläche schneidet. Die Verschiebung muss nach aussen abgebaut werden. Das Ende (oder der Anfang) einer Verwerfungsfläche ist eine Linie, auf der der Verschiebungsbetrag der Gleitregion auf null geschrumpft ist.



Das Verhältnis zwischen Länge und Breite der elliptischen Fläche bei Abschiebungen ist ungefähr  $> 1$  und  $< 5$ . Diese Linie, die die elliptische Bewegungsfläche umgibt, wird **Frontallinie** (*tip line*) genannt. Das heisst, dass die Frontallinie bewegte von nicht-bewegten Gesteinen trennt. Über die Frontallinie hinaus wird die Verschiebung durch Verformung in der **Frontalzone** abgebaut und auf verschiedene Art und Weise **akkommodiert**. Dies hängt ab vom Verhältnis der Verwerfungslänge zum Betrag der Verschiebung.

- Wenn die Verschiebung im Verhältnis zur Länge des aktiven Segments sehr klein ist, können die Raum- und Kontinuitätsprobleme durch allmähliche Reduktion der Verschiebung gegen die Frontallinie zu. Die Abnahme der Verschiebung auf der Verwerfungsfläche wird kompensiert durch nicht-spröde Deformation (penetrative Verformung und/oder Faltung) im angrenzenden Gestein entlang dem Verwerfungsende, dem sogenannten **duktilen Wulst** (*ductile bead*).
- Wo die Verschiebung im Verhältnis zur Länge der Verwerfung gross ist, kann die Deformation um die Verwerfung herum innerhalb einer **Beschädigungszone** (*damage zone*) durch Assoziation von kleineren Verwerfungen und zusätzlichen Brüchen, besonders im Hangenden, angepasst werden.

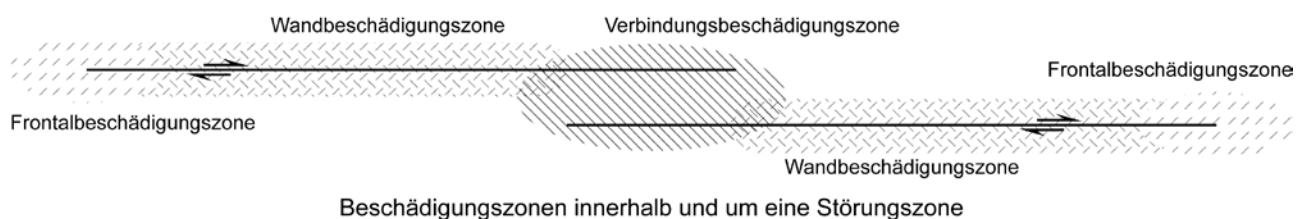


3D konzeptionelles Modell einer Beschädigungszone um eine Störung

### Beschädigungszonen

Die Beschädigungszonen treten infolge von Spannungskonzentration, besonders an den Verwerfungsspitzen und in den Verbindungszonen auf; sie bilden sich auch, um Veränderungen im Versatz in oder entlang der Verwerfung aufzunehmen. Bruchbildung, Ausbreitung und Interaktion teilen Beschädigungszonen in Frontal-, Wand- und Verbindungsbeschädigungszonen in Bezug auf ihren Standpunkt innerhalb und um eine Verwerfungszone ein.

- Eine Frontalbeschädigungszone entwickelt sich in Reaktion auf Druckkonzentration an einer Verwerfungsspitze.
- Wandbeschädigungszonen können entlang der gesamten Spur einer Verwerfung verteilt werden. Sie können die Frontalbeschädigungszonen darstellen, die in den Wandgesteinen zurückbleiben, während sich Störungen durch die Gesteine fortpflanzen. Sie können auch die Deformation der Wandgesteine darstellen, die mit der Vergrößerung des Versatzes verbunden ist.



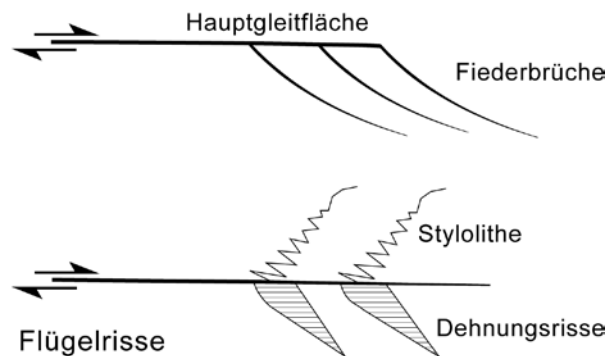
- Verbindungsbeschädigungszonen werden durch die Interaktion und die Verbindung der Verwerfungssegmente in einer verhältnismässig kleinen Region verursacht. Sie sind durch den angehäuften Versatz und durch die Interaktion der Beschädigungszonen an der Wand- und Spitze von zwei benachbarten Verwerfungen verkompliziert. Folglich können die Verbindungsbeschädigungszonen eine Reihe von Bruchmustern entwickeln abhängig von der Interaktion zwischen den zwei Verwerfungssegmenten.

### Die Enden von Verwerfungen

Mesoskopische Beschädigungszonen vor den Frontallinien werden in vier Unterteilungen entsprechend der dominierenden Art und der Orientierung der entwickelten Brüche unterteilt: Flügelrisse, Fiederbrüche und synthetische bzw. antithetische Zweigverwerfungen. Beschädigungszonen an den Verwerfungsspitzen sind leicht zu erkennen, selbst im grossen Massstab.

### **Flügelrisse**

**Flügelrisse** (*wing cracks*) treten auf, wo es eine schnelle Abnahme des Versatzes an der Verwerfungspitze gibt, an Unregelmässigkeiten der Verwerfungsfläche wie Bogen, Treppen oder Relaiszonen und an Punkten von variablen Reibungseigenschaften entlang der Verwerfungsfläche. Sie berühren die Hauptverwerfungsfläche und sind Dehnungsbrüche, die dazu neigen sich parallel zur lokalen  $\sigma_1$ -Richtung im Dehnquadrant der Verwerfungsfront zu entwickeln.



### **Anticracks**

**Anticracks** sind Lösungsflächen (**Styrolite**), die symmetrisch zu Flügelrissen in Bezug auf die Hauptscherfläche entstehen. Sie entwickeln sich senkrecht zur lokalen  $\sigma_1$ -Richtung im Druckquadrant der Verwerfungsfront.

### **Fiederbrüche**

**Fiederbrüche** (*feather or pinnate fractures*) sind Dehnungsbrüche, die sich *en-écheleon* entlang der Scherbruchfläche bilden. **Spannungsbrüche** (*tension gashes*) sind Fiederbrüche, die von Mineralkristallisation ausgefüllt werden.

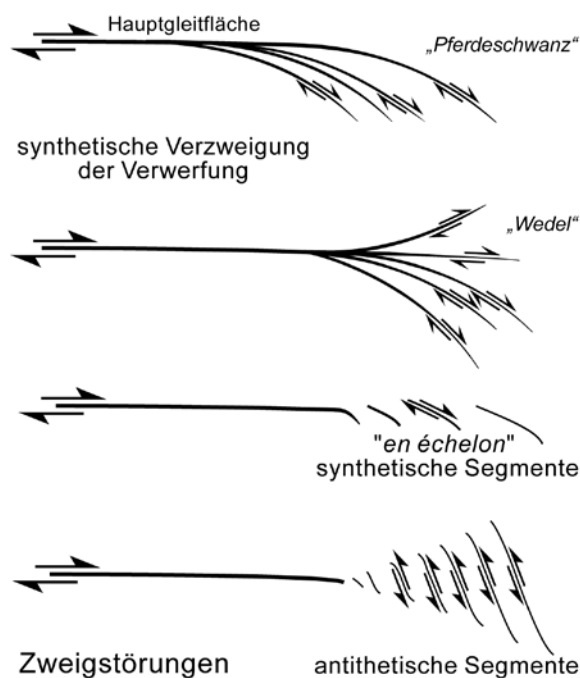
### **Zweigverwerfungen**

#### Synthetische Zweigverwerfungen

**Synthetische Zweigverwerfungen** (*synthetic splay faults*) sind Flügelrissen geometrisch und mechanisch ähnlich, sind aber feiner und näher beieinander mit verhältnismässig niedrigen Winkeln zu den Hauptverwerfungen. Sie haben die gleiche Bewegungsrichtung wie die Hauptverwerfung und können sich mit einem benachbarten Verwerfungssegment verbinden. „**Schachtelhalm**“-**Brüche** (*horsetail fractures*) scheren asymmetrisch, häufig auf einer Seite der Hauptstörung in einem fächerförmigen Netz heraus. Sie neigen sich dort zu entwickeln, wo die relative Bewegung eher stufenweise in Richtung zur Störungsspitze abnimmt, anders als bei Flügelrissen.

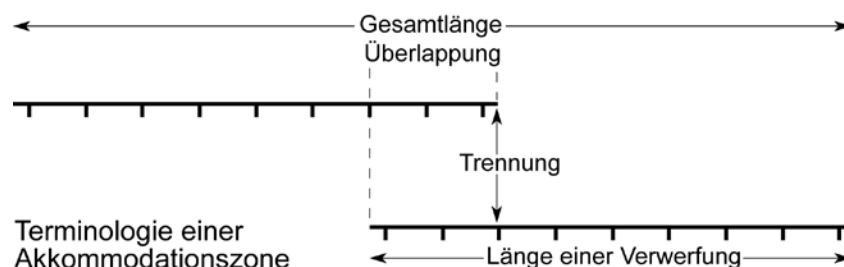
#### Antithetische Zweigverwerfungen

**Antithetische Zweigverwerfungen** (*antithetic splay faults*) haben eine Bewegungsrichtung entgegengerichtet zu der der Hauptverwerfungen und entwickeln sich meist in einem hohen Winkel ( $60-70^\circ$ ) zur Hauptverwerfung. Sie sind isolierte Verwerfungen die von der Hauptverwerfung separiert sind. Ihre Länge und ihr Abstand zueinander vergrössern sich mit dem Abstand von der Verwerfungsspitze.



### Akkommodationszonen

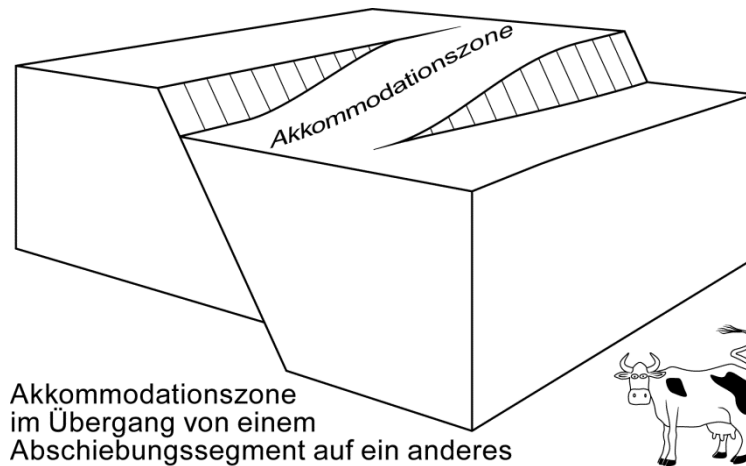
Eine **Relaiszone** ist ein Volumen von Gestein, das zwei nicht genau in einer Ebene liegende Verwerfungssegmente trennt. Die **Überschreitung** (*overstep*) ist der offene Abstand zwischen den zwei subparallelen Verwerfungssegmenten (eigentlich zwischen zwei ähnlichen Strukturen). Wenn die Normale der Spitze einer überschreitenden Verwerfung die anderen Verwerfungen schneidet, gibt es **Überlappung** (*overlap*). Die Alternative ist **Unterlappung** (*underlapping*). Der Abstand zwischen den überlappenden, parallelen Verwerfungssegmenten ist die **Trennung** (*separation*).



Trennung/Überlappung Verhältnisse liefern ein grobes Mass der Abhängigkeit zwischen den Verwerfungen. Der Grad von Abhängigkeit lässt sich besser bestimmen, wenn die Trennungs- und Überlappungs-Werte zur Verwerfungslänge von einer und zu einer beliebigen der zwei aufeinander einwirkenden Verwerfungen normiert werden. Überlappungen werden beschrieben, als **rechts-** oder **links-„springend“** (*right-* oder *left-stepping*), abhängig von der Richtung des Sprungs von einer Struktur zur folgenden.

Relaiszonen entwickeln sich bei der Zunahme der Überlappung als Folge des Wachstums und der Verlängerung von Störungen. Folglich, können die Relaiszonen zu grossen **Relaisstrukturen** (*relay structure*) führen. Eine Relaisstruktur überträgt den Versatz eines Verwerfungssegments auf ein anderes Segment. Eine **Relaisrampe** (*relay ramp*) ist ein Bereich in dem die Schichtung gebogen ist. Die Relaisrampe überträgt die Versätze zwischen zwei sich überschreitenden Verwerfungen, die häufig gleichzeitig sind.

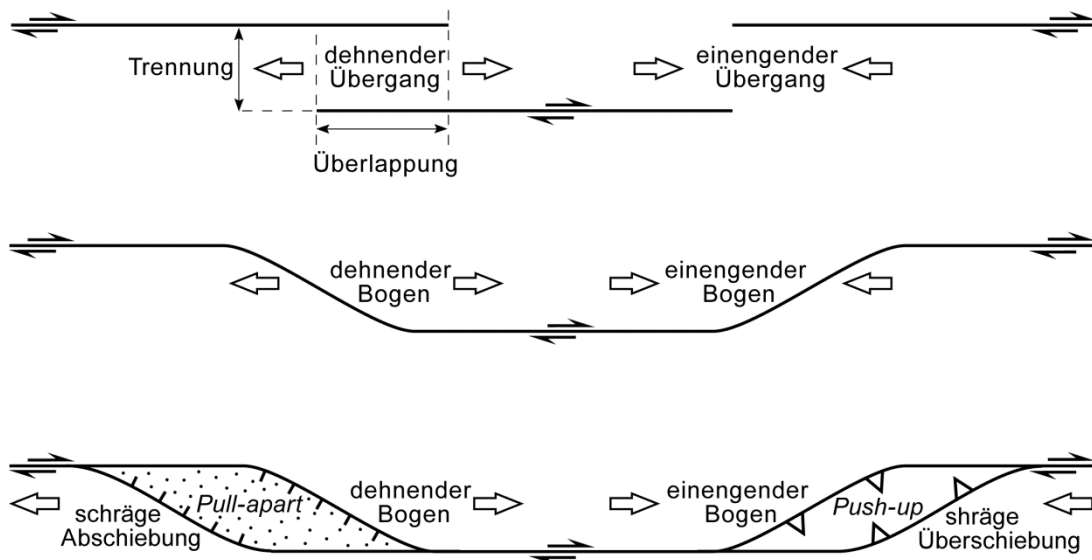




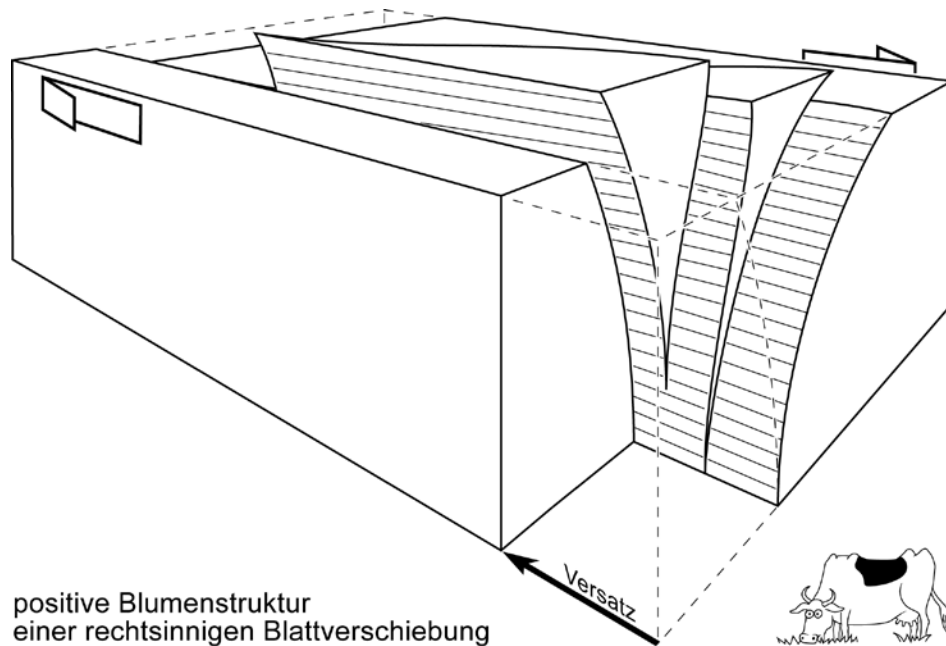
Die Relaisrampen ist, sie sind vorübergehende Strukturen, die sich während der Störungsausbreitung entwickeln, bis sie durch **Durchbrüche** (*breaching faults*) ersetzt werden, die die aufeinander interagierenden Störungssegmente zusammenfügen (Entwicklung von Weich- zur Hartverknüpfung) um eine einzelne, durchgehende Verwerfungsfläche zu bilden. Die Verknüpfung von einzelnen und Doppelspitzen sind offensichtliche Muster, die Verwerfungskrümmungen und Versetzungen bilden, wobei sich das Einfallen und das Streichen einer Blattverschiebung ändern.

Änderungen in der Orientierung der Verwerfungsfläche führen zu kompressiven oder extensiven Deformationszonen, je nach der Form der Versetzung in Bezug auf die Verwerfungsbewegung.

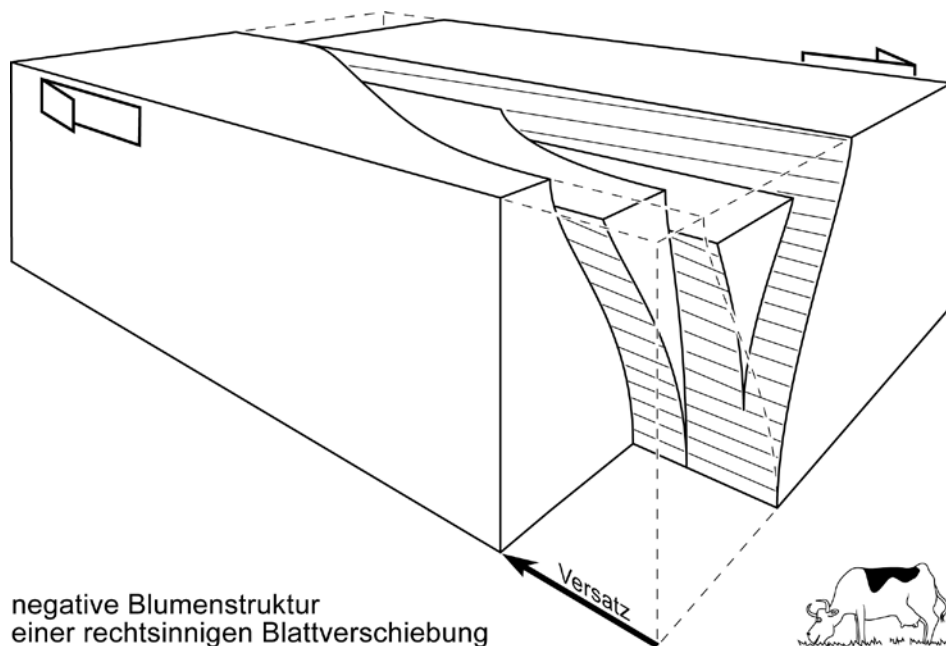
#### Geometrie von einengenden und dehrenden Übergängen und Bögen entlang einer rechtssinnigen Blattverschiebung



Eine parallele, jedoch seitlich versetzte Anordnung von Blattverschiebungen, ist kinematisch durch verknüpft. Auf diese Art wird beispielsweise in der **Überlappungszone** (*overlap zone* oder *transfer zone*) zweier paralleler dextraler Verwerfungssegmente das Gestein gestreckt. Die Streckung findet gewöhnlich durch Ausbildung von Abschiebungen statt, und bildet damit Lücken oder Dehnungsbereiche gefüllt mit Adermaterial oder Beckensedimente (**rhombenförmige Becken**: *rhomb-shaped basin*, sogenannte **pull-apart Becken**: *pull-apart basins*). Falls in der Überlappungszone zweier Verwerfungen Kompression auftritt, so bilden sich Lösungsstrukturen, Antiklinalen oder Horste. Solche Überlappungsstrukturen, bei denen die Überschiebungen der Überlappungszone in grossen Blattverschiebungen wurzeln, werden manchmal auch **Blumenstrukturen** (*flower-structures*) genannt.



Manchmal wird auch von positiven Blumenstrukturen bei kompressiven Überlappungszonen, und von negativen Blumenstrukturen bei gestreckten, pull-apart Becken gesprochen. **Verschiebungsgradienten** (*throw gradients*) neigen dazu, in den Relaiszonen am höchsten zu sein.



### Gesteine in Bruchzonen

Gebrochene Gesteine bilden begrenzte Wände auf beiden Seiten der Verwerfungszone, die häufig mit Verwerfungsgesteinen gefüllt ist. Die geltende Klassifikation von Gesteinen in Bruchzonen, d.h. die Gesteinsarten, die durch Bruchbildung verursacht werden, benutzt die Kohäsion zu der Zeit der Verwerfungsbewegung und die Anwesenheit eines planaren Gefüges.

Zwei Hauptarten von Gesteinen können in Bruchzonen identifiziert werden:

- Inkohäsive Gesteine in den spröden Verwerfungszone. Diese Gesteine haben ein willkürliches Gefüge.

- Kohäsive Gesteine in den duktilen Verwerfungszonen. Diese Gesteine haben ein geschiefertes Gefüge.

### Inkohäsive und nicht-geschieferte Verwerfungszonengesteine

Bruchbildung im spröden Bereich wird durch **Zerkleinerung** (*comminution*) der Gesteine gekennzeichnet. Die resultierenden, inkohäsiven und richtungslosen Verwerfungszonengesteine werden **Kataklasite** (*cataclasite*) genannt.

#### **Beschreibung – Definition**

Kataklasite sind zufällig verteilte Aggregate aus eckigen, zerbrochenen Fragmenten des Gesteins an den Seitenwänden der Verwerfung. Die Fragmente sind unterschiedlich gross und können durch ein zementartiges Material (Ausfällungen aus zirkulierenden Flüssigkeiten) verkittet werden. Entsprechend der Grösse der Elemente, unterscheidet man:

- \* **Verwerfungsbrekzien** (*fault breccia*), wenn sichtbare, eckige Fragmente mehr als 30% des Gesteins ausmachen;
- \* **Mikrobrekzien** (*microbreccia*), wenn die Fragmente mikroskopisch klein sind;
- \* **Verwerfungsletten** (*gouge*) liegt vor, wenn mehr als 70% des Materials hauptsächlich aus sehr feinkörnigem, tonartigem und häufig dunklem Pulver, das kleine eckige Fragmente enthält, besteht. Tonmineralien resultieren aus Verwitterung und/oder hydrothermalen Umwandlung der zerquetschten Verwerfungsgesteine. Verwerfungsletten und gleichwertige feinkörnige Verwerfungsabnutzungen werden selten verfestigt.

Späte Bewegungen können ein eindeutiges planares Gefüge in diesen gebrochenen Gesteinen verursachen, die jedoch spröde, d.h. nicht verfestigt bleiben.

#### Terminologie der Verwerfungszonengesteine

metamorphe Bedingungen	sehr niedriggradig	niedriggradig	mittelgradig	hochgradig	
	<b>Kataklasite</b>		<b>Mylonite</b>		
Hauptarten von Gesteinen an Bruchzonen	<b>inkohäsiv</b>		<b>kohäsiv</b>		
	Fragmente %			Matrix %	
	>30	Brekzie		Protomylonit	<50
		Mikrobrekzie		Mylonit	50<<90
	<30	Verwerfungsletten		Ultramylonit	>90
		Pseudotachylit (geschmolzen)			>85

#### **Stellung**

Hauptverwerfungen weisen keine getrennte Scherfläche sondern einen planaren **Kern** auf, der bis zu einigen Metern dick ist. Dieser Kern wird im Wesentlichen vom Abnutzungs-Detritus, der von den Störungswänden stammt, gebildet. Kataklasite, die gebrochenen Gesteine, bilden die Beschädigungszone, die das ausgebreitete Volumen der verformten Gesteine um eine Störungsfläche oder -Kern darstellt.

#### **Kataklase**

**Kataklase** (*cataclasis*) entsteht aus der Bruchbildung, der Ausbreitung, der Interaktion und der Versatzansammlung entlang einer Verwerfung. Die inkohäsiven Verwerfungszonengesteine werden im Wesentlichen durch Kataklase gebildet: Dieser Deformationsprozess schliesst sowohl das Zerkleinern von Kristallen und Kristallgrenzen wie auch **Dilatanz** (*dilatancy*), die Festkörperrotation zwischen körnigen Partikeln erlaubt, mit ein. Es kann als mechanische

Granulation und/oder Zerquetschen, das den zusammenhängenden Fels pulverisiert, beschrieben werden. Der Prozess ist in der oberen Kruste häufig, weil die Verformungsrate schnell, der Umgebungsdruck und die Temperatur verhältnismässig niedrig sind ( $< 500$  MPa,  $200-300^{\circ}\text{C}$ ).

Die Grössenverteilung der zerkleinerten Partikel ist ein Mass der Energie, die für Kataklyse verwendet wird. Die Verwerfungsletten zeigen Grössenverteilungen mit fraktalen Dimensionen  $> 1,6$ .

### Kohäsive und geschieferte Verwerfungszonengesteine

Kohäsive, geschieferte, meist linierte Gesteine gehören zur **Mylonitserie** (*mylonite*). Sie sind im Dünnschliff charakterisiert durch eine plattige oder stängelige Struktur. Körner der Gesteinsmatrix sind in der Grösse ohne den Verlust der Primärzusammensetzung verringert worden. Die Mylonite sind charakterisiert durch feine Korngrössen und eine Mikrostruktur, die auf duktile Deformation und dynamische Rekristallisation zurückgeführt werden kann (viskoses Kriechen). Sie können grössere Fragmente oder Mineralien des Ursprungsgesteins enthalten; diese Fragmente werden **Porphyroklasten** genannt. Mylonitisierung ist ein gradueller Prozess von Korngrössenreduktion, in dem drei Gesteinsarten für die Klassifikation von mylonitischen Gesteinen mittels des relativen Anteils von Porphyroklasten zur feinkörnigen Matrix festgelegt werden:

- Ein **Protomylonit** (*protomylonite*) ist ein Gestein in der Anfangsphase der Mylonitisierung, das mehr als 50% Porphyroklasten enthält.
- Ein zutreffender Mylonit enthält 10-50% an Porphyroklasten.
- Eine äusserst intensive Korngrössenverkleinerung und dynamische Rekristallisation entlang von Störungen kann zu einer harten, dunklen Füllung aus ultramikroskopischen Körnern führen, welche weniger als 10% von kleineren Porphyroklasten enthält. Dieses Material nennt man **Ultramyonit** (*ultramylonite*).

Der Ausdruck **Blastomyonit** (*blastomylonite*) wird hingegen nur für nach der Mylonitisierung stark rekristallisierte Gesteine angewendet.

Ein **Phyllonit** (*phyllonite*) ist ein glimmerreicher Mylonit der mesoskopisch aussieht wie ein Schiefer.

### Pseudotachylite

An gewissen Verwerfungen treten dünne, glasige und dunkle Adern kohäsiver und untexturierter Gesteine auf, die aussehen wie vulkanisches Glas. Sie sind unter dem Namen **Pseudotachylit** (*pseudotachylite*) bekannt. Typischerweise haben sie die Form eines Netzwerks verzweigter Injektionsadern, das von der Bruchzone ins angrenzende Gestein, meist Kristallin, eindringt. Diese Adern zeigen an, dass der Pseudotachylit einen flüssigen Aggregatzustand hatte. Die glasige Matrix enthält gewöhnlich Gesteinseinschlüsse und mikroskopische Sphärolithe. Pseudotachylite entstehen aus lokalen Schmelzen, die durch Reibungswärme entstanden sind. Die Reibungswärme kam infolge einer raschen ( $> 10$  cm/s) Bewegung zweier Gesteinskörper entlang einer Verwerfungsebene zustande. In den meisten Fällen hat spätere Entglasung (Devitrifikation) zum Verlust der glasigen Beschaffenheit geführt. Es wird angenommen, dass Pseudotachylite durch eine seismische Bewegung und eine lokale Dekompression in Verbindung mit schnellem Schmelzen, gefolgt vom Löschen und von der Verfestigung des flüssigen Materials entstehen.

### Verwerfungszonengesteine in der Tiefe

Die verschiedenen Arten von Störungsgesteinen neigen dazu, sich in verschiedenen Tiefen zu bilden:

Inkohäsive Verwerfungsletten und Breckzie:	0-5 km
Kohäsive Kataklysite und Pseudotachylite:	10-15 km
Kohäsive Mylonite:	$> 10-15$ km

## Bestimmung der Verschiebung

Es können verschiedene Methoden angewendet werden, wenn möglich in Kombination, um eine Verwerfungsverschiebung zu bestimmen.

### Seitenverschiebung geologischer Strukturen

Ein erstes Anzeichen, dass man eine Verwerfung erkannt hat, basiert auf der Kenntnis der stratigraphischen Abfolge. Z.B. in einem Bohrloch, kann die Ursache für eine **Wiederholung** (*repetition*) von Schichten eine Überschiebung und die Ursache für **Lücken** (*omission*) von Schichten eine Abschiebung sein. Diese Vereinfachung ignoriert indessen die möglichen horizontalen Bewegungen an Blattverschiebungen mit einem eigenem Fallwinkel.

Für eine umfassende Bestimmung der Verschiebung ist es erforderlich, die Positionen von zwei ursprünglich zusammentreffenden Punkten auf jeder Seite der Verwerfung festzustellen. Solche Punkte können definiert werden durch die Kreuzung der Verwerfungsebene mit einem linearen Element, z.B. einem Faltenscharnier, das bereits vorhanden war, und durch die Verwerfung verschoben wurde. **Durchstichpunkte** (*piercing points*) sind Punkte, wo ein lineares Element die Verwerfung durchsetzt.

Wo das versetzte Linearmerkmal durch die Kreuzung von zwei planaren Strukturen festgelegt ist, müssen die beiden planaren Strukturen der Verwerfung vorangegangen sein. **Versatz-Kontaktlinien** auf geologischen Karten können gänzlich irreführend sein, weil sie durch die Kreuzung einer geologischen Ebene, die älter als die Verwerfung ist, und eine topographische Oberfläche, die jünger ist als die Verwerfung, begrenzt sind. Dasselbe kann für Versätze in einem Profil zutreffen, oder wenn man dasselbe in Aufschlüssen irgendeiner Orientierung beobachtet. Um die Seitenverstellung planarer Merkmale von der Seitenverstellung linearer Merkmale zu unterscheiden, nennt man die erstere **Trennung** (*separation*).

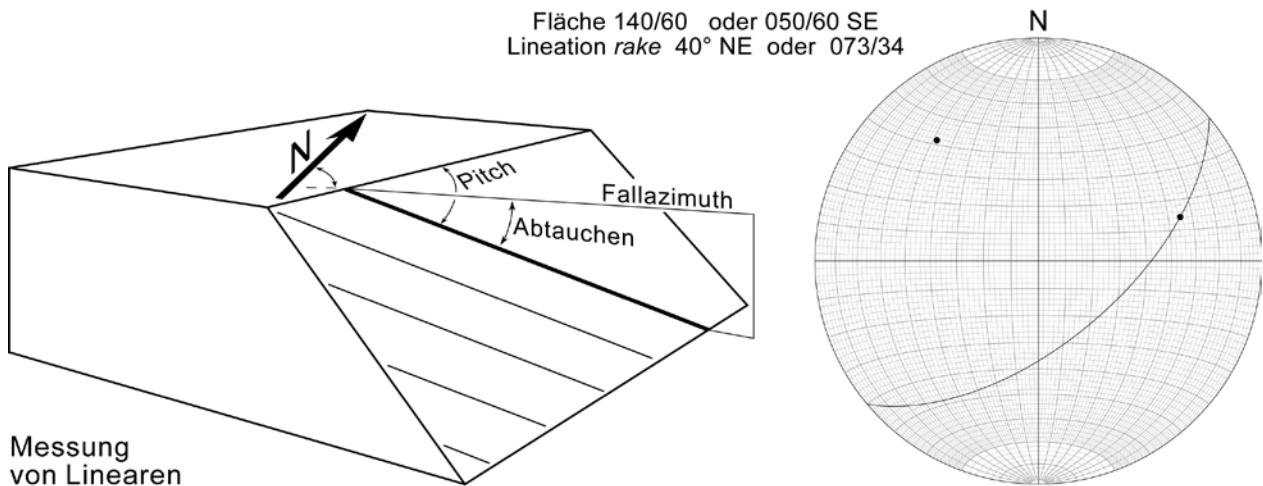
Generell lässt sich Blattverschiebung und die horizontale Komponente bestimmen. Weil diese Karten keine (primäre) Höheninformation enthalten ist keine Aussage über vertikale Versätze möglich.

Ein Minimalwert der totalen Sprunghöhe einer Verwerfung kann dort angegeben werden, wo z. B. ältere Gesteine über jüngere überschoben wurden, oder durch die Distanz zwischen Klippe und Fenster. Bitte beachten Sie indessen, dass die Klippe-zu-Fenster-Methode unbrauchbar ist, wenn die vom Fenster zur Klippe gezogene Linie nicht beinahe parallel zur Verschiebungsrichtung verläuft.

### Diagnostische Bewegungsstrukturen innerhalb von Verwerfungsflächen

Gesteine am Kontakt zu Verwerfungsflächen haben oft glänzende, weiche oder polierte Oberflächen von mineralisiertem Material, die sogenannten **Gleitflächen** oder **Spiegelharnische** (*slickensides*). Diese entstehen durch abschleifende Wirkung und können nichts sagend sein, doch manchmal fühlen sie sich in Gleitrichtung glatter an. In der Tat sind parallele **Striungen** (*striation*) oft auf den Verwerfungsflächen zu erkennen.

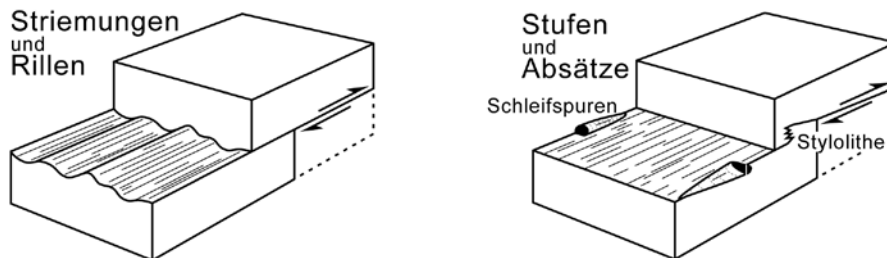
Der Winkel gemessen auf der geneigten Verwerfungsfläche zwischen der Horizontalen (Streichrichtung) und der Linie der Striungen wird **pitch** oder **rake** genannt. Solche **kataklastische Lineation** (*cataclastic lineation*) bestimmen nur den Gleitvektor auf der Verwerfungsfläche. Die assoziierten asymmetrischen Oberflächenstrukturen sind **kinematische Indikatoren** (*kinematic indicators*) für den Bewegungssinn.



Die häufigsten und zuverlässigsten Bewegungsindikatoren, die im Aufschluss auf Harnischflächen beobachtet werden können, sind:

### **Kratzspuren**

Gleitflächen besitzen für gewöhnlich auffällige **Striemungen** (*striations*) oder **Kratzer** (*scratches*), die in jedem Massstab auftreten. Experimente haben gezeigt, dass diese Abnutzungskratzer parallel zur Relativbewegung der Verwerfung verlaufen. Die meisten Striemungen (**Rutscharnische**) sind definiert durch Streifen von Mineralien in feinkörnigem Material entlang der Verwerfungsebene. Einige **Rutschstriemen** (*striae*) können die **Rillen** (*grooves*) oder **Rinnen** (*gutters*) eines harten Objekts der anderen Bruchseite sein, die vorbeigleitet. Kanten und Rillen können lange, lineare, Wellen auf der Störungsfläche sein. Im mikroskopischen Massstab kennzeichnet eine bevorzugte Orientierung der Körner solche Lineationen, insbesondere in den weichen Sedimenten. Diese geraden Strukturen zeigen die Bewegungsrichtung an, nicht aber den Bewegungssinn.



### **Kratzspuren und Schleifspuren durch Bruchstücke**

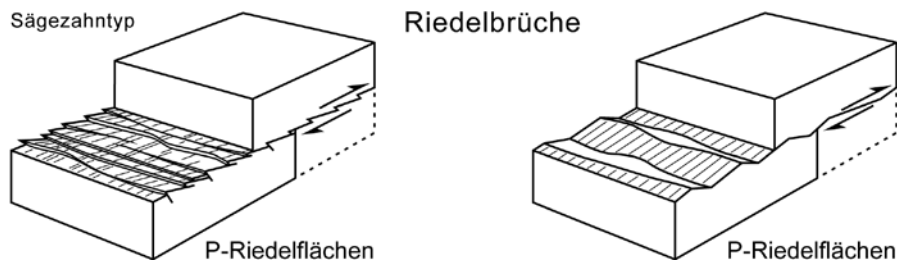
Ein hartes eingestauchtes Objekt kann in der einen Wand der Störungsfläche stecken, während die dazugehörige Rille oder Vertiefung auf der entgegengesetzten Oberfläche zu finden ist. Manchmal zeigt eine Vertiefung um das harte Objekt die wie ein Löffel geformt den relativen Schersinn der Bewegung an. Das Objekt kann dann am äussersten Ende einer Rille steckend gefunden werden. Damit ist der Sinn der relativen Bewegung bestimmt. Andererseits kann sich das harte Bruchstück in Richtung des Gleitens hinter einer Unebenheit, vor Erosion geschützt, befinden und eine Spur in Bewegungsrichtung bilden. **Letten** (*gouges*) können hinter harten Objekten anwachsen, und so die Bestimmung der Gleitrichtung ermöglichen.

### **Nadelharnischen**

Unregelmässigkeiten auf der Verwerfungsfläche, Rauheiten (*asperities*) oder kleine Stufen können eine gestreifte oder stylolithische Oberfläche (**Nadelharnische**, *slickolites*) aufweisen, welche die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks anzeigen. Nadelharnische definieren die Lösungsflächen, die zur Versatzrichtung zeigen mit mikrostylolithischen Spitzen die einen niedrigen Winkel zur Störungsfläche haben und gegen die Bewegungsrichtung gerichtet sind.

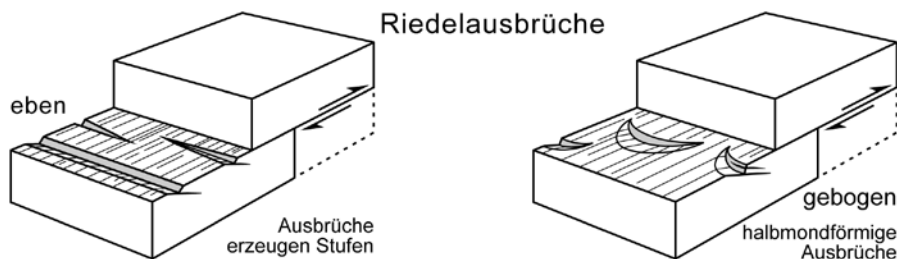
### Abrisskanten

**Rattermarken** (*chatter marks*) sind kleine, asymmetrische **Stufen** oder **Absätze** (*steps*), deren Kanten in eine Richtung schauen und mehr oder weniger senkrecht zu den Strömungen stehen. Diese Stufen wurden traditionsgemäß als Bewegungssinnanzeiger gedeutet, indem die Absätze dem relativ vorbeigleitenden Block „nachschaun“, mit dem Absatz der Versatzrichtung der entgegengesetzten Oberfläche der Gleitfläche gegenübergestellt. Es wurde im Experiment aufgezeigt, dass verschieden orientierte Stufen einhergehend mit reibungstragender Strömung oder auch schräge Stylolithenreihen mit Stufen gegen die Bewegungsrichtung entstehen können. Es gibt aber bezüglich der kinematischen Bedeutung solcher Stufen keine schlüssige Regel.



### Riedelscherflächen

Kleine gestriemte R-Riedelbrüche schneiden häufig die Störungsfläche und sind fast orthogonal zur Bewegungsrichtung. R- und R'-Riedelbrüche weisen meistens einen regelmässigen Abstand auf und weisen ein gezacktes Profil zur Störungsfläche auf, mit Stufen die gegen die Bewegungsrichtung zeigen. Die Kombinationen von R- und P-Riedelbrüchen, die fast senkrecht zur Bewegungsrichtung sind, ergeben wechselnde gestriemte Flächen (P-Scherbrüche weisen gegen die Bewegungsrichtung) und nicht gestriemte Flächen (R-Scherbrüche in der Schutzseite von Unebenheiten). Die Intensität der Striemenbildung oder nicht-Striemenbildung, die vom Verhalten der topographischen Unebenheiten auf der Störungsfläche abhängig ist, ist ein herkömmliches kinematisches Kriterium.



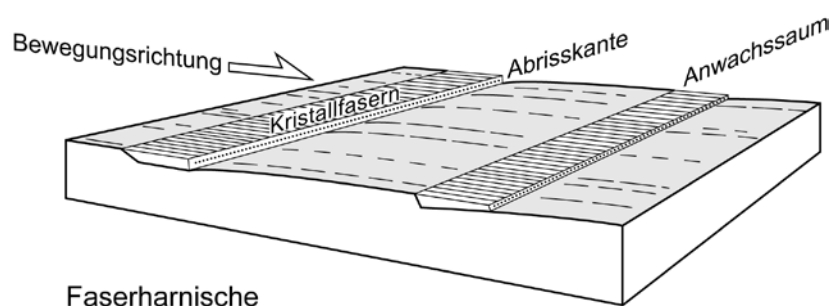
### Reibungsbrüche

**Reibungsbrüche** (*friction fractures*) fallen mit der Bewegungsrichtung ein (R-Riedelbrüche). Sie sind konkav, damit ist ihre Schnittlinie mit der Verwerfungsfläche gebogen (**halbmondförmigen Spur; crescent-shape**). Die Spitzen der halbmondförmigen Ausbrüche zeigen die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks an.

### Faserharnische

Die bevorzugte Richtung des Mineralienwachstums während der Störungsbewegung produziert faserige Kristalle die, mit ihrer Längsachse parallel zur dominierenden Gleitrichtung, in sich öffnenden Rissen hinter Stufen oder Rauheiten auf der Gleitfläche wachsen. Diese **Faserharnische** (*slickenfibres*) (oder **Anwachskristallisate**) sind besonders wertvoll, weil sie den Bewegungssinn klar anzeigen. Die Fasern wachsen entweder während des langsamen, aseismischen Verwerfungskriechens oder sind sogenannte *crack-seal fibers*, die eine grosse Zahlen von Mikroerdbeben aufzeichnen (solche Faserkristallisate geben also auch die Grösse des Versatzes an, da sie ursprünglich zusammengehörige Punkte verbinden). Gekrümmte oder aufeinander liegende

Kristallfasern sind ein Dokument der Veränderungen in der Versetzungsrichtung. Im Gegensatz dazu können gewöhnliche Gleitflächenkratzer oft ausradiert oder überprägt werden, wenn Änderungen in der Verwerfungsrichtung auftreten. Gewöhnliche Kratzer können nur die letzte gleichförmige Verschiebung aufzeichnen können.



### ***Nicht-gestriemte, mineralisierte Spalten***

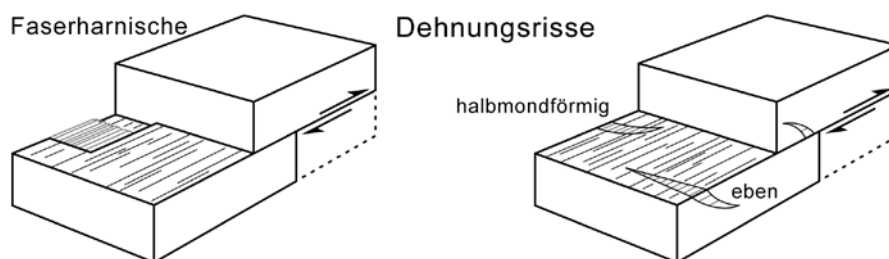
Gerade, vorwärts-einfallende, flache und halbmondförmige Brüche bilden sich in einem niedrigen Winkel zur Störungsfläche und neigen dazu, sich in Richtung zu grösseren Winkeln während der Deformation der Wandgesteine infolge der Reibung zu rotieren. Während der Rotation öffnen sich die Brüche für Sekundärmineralkristallisation. Gerade Brüche werden „Kammbrüche“ (*comb fractures*) genannt. Die Spitzen der halbmondförmigen Ausbrüche zeigen die Bewegungsrichtung des fehlenden Blocks an.

### **Diagnostische Bewegungsstrukturen innerhalb von Verwerfungszonen**

Die bewegungsbezogenen Strukturen in den Verwerfungszonen und auf den Erosionsflächen, die orthogonal zur Verwerfungsfläche und parallel zur Bewegungsrichtung sind, werden benutzt, um die Verwerfungs kinematik zu definieren.

### ***Dehnungsbrüche; Fiederspalten***

**Dehnungsbrüche** (*tensile fractures*) oder **Fiederspalten** (*tension gashes*), die parallel zur regionalen maximalen Hauptspannung (Kompression) stehen, können gewöhnlich nahe der Bruchfläche mit Winkel kleiner als  $45^\circ$  zur Bruchfläche auftreten. Ihre Schnittfläche mit der Verwerfungsfläche ist fast senkrecht zur kataklastischen Lineation.



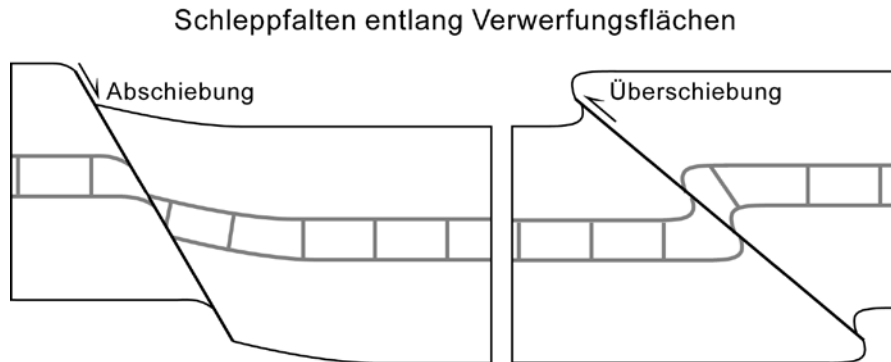
Ihre Winkelbeziehungen können für die Bestimmung der Bewegungsrichtung hilfreich sein, wie auch später bei den Fiederklüften abgehandelt wird. Zusätzlich können sich S- oder Z- Formen, abhängig von linkssinniger beziehungsweise rechtsinniger Scherrichtung, entlang der Verwerfung ausbilden.

### ***Schleppfalten***

An die Verwerfung anstossende Schichten können sich in Bewegungsrichtung des gegenüberliegenden Blocks krümmen. Diese lokalen Flexuren sind unter der Bezeichnung **Schleppfalten** (*drag folds*) bekannt. Diese Benennung ist eine Interpretation, die postuliert, dass eine Verwerfung zuerst eingeleitet wird, und dass die Faltung entsteht, indem ein Block neben dem andern entlanggezogen wird.



Diese Anwendung kann irreführend sein, weil die Krümmung auch im entgegengesetzten Sinn zur Verschiebung (*reverse drag*) vorkommt. Umgekehrte Schleppung ist eindeutig unabhängig von eigentlichen Schleppeffekten. Im Einzelfall ist sie jedoch kaum zu unterscheiden von der wirklichen Schleppung. Zudem ist die Orientierung solcher Falten oft nicht durch die Bewegungsrichtung gesteuert, sondern eher von der Schnittlinie zwischen Schichtung und Verwerfungsebene. Schleppfalten sollten deshalb mit grösster Sorgfalt interpretiert werden.



### *Konjugierte Riedelscherflächen*

### **Experimentelle Verwerfungsbildung im Sand**

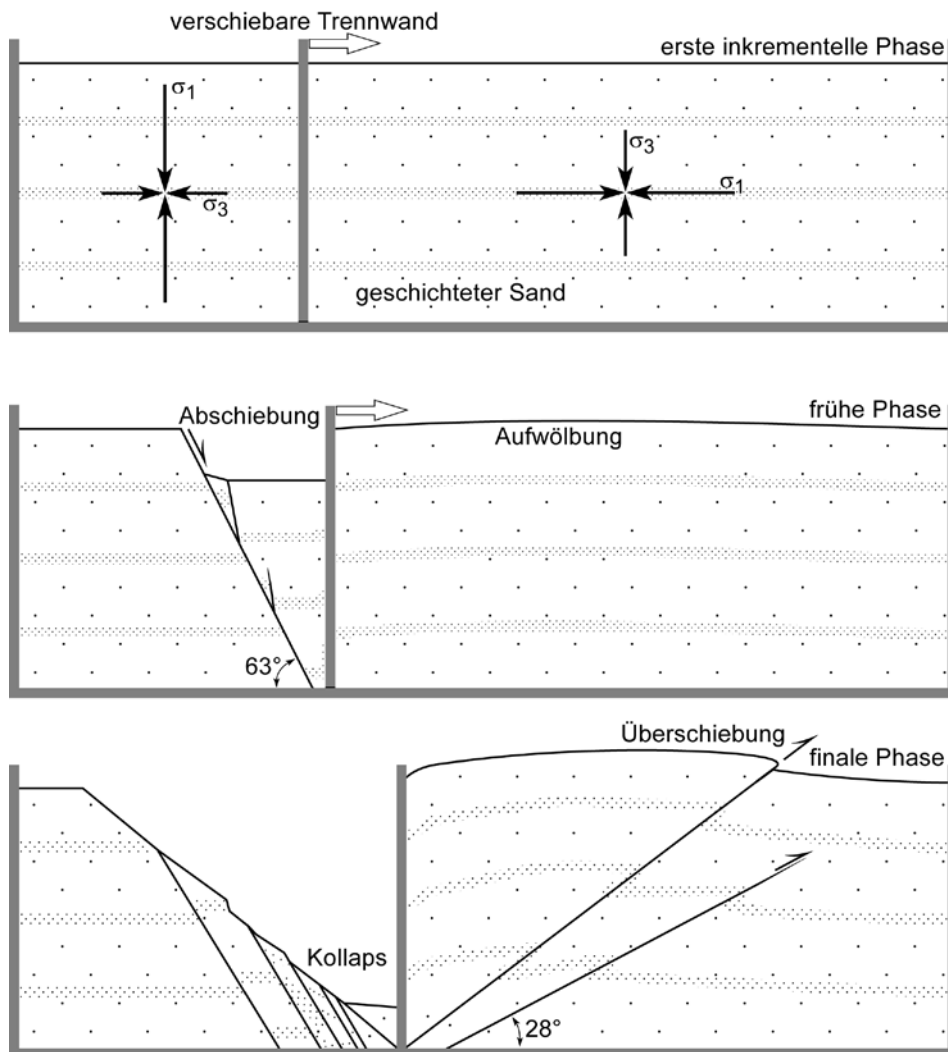
Bereits sehr früh haben Studenten des mechanischen Gesteinsverhaltens beobachtet, dass trockener Sand Verwerfungsstrukturen aufweist, die ähnlich zu denen im Gestein erkannten sind. Tatsächlich ist es empirisch überprüft worden, dass trockener Sand dem Kriterium des Coulomb'schen Verhaltens mit einem gesteinsähnlichen internen Reibungswinkel (30-40°, abhängig von der Packungsdichte) und einer Kohäsion um 100 Pa entspricht. Folglich ist trockener Sand eine ausgezeichnete Analogie für die Simulation spröder Deformation in der oberen Kruste unter dem Einfluss des Erdgravitationsfelds.

Ein berühmtes Experiment wurde von Hubbert durchgeführt. Er baute einen Glaskasten, der in zwei Fächer durch eine steife, bewegliche Trennung geteilt wurde, die zur langen Achse des Kastens parallel versetzt werden kann. Der Kasten wurde mit losem Sand mit unterschiedlichen Farben gefüllt (und im Fall Hubberts Gipspulver), damit Schichten und horizontale Markierungen besser gesehen werden konnten. Wenn die Abtrennung rechts (mit einer Schraube) verschoben wird, wird das linke seitliche Fach verlängert, während das rechte seitliche Fach durch den gleichen Betrag verkürzt wird.

Die erste Sache die geschieht, ist im verlängerten Fach die Entwicklung einer eindeutigen Abschiebung, die 60-65° eintaucht. Währenddessen ist im verkürzten Fach nur ein geringfügiges Ausbeulen zu sehen. Wird die Abtrennung weiter verschoben, treten in der verkürzten Seite Aufschiebungen, die mit 25-30° einfallen, auf. Diese tauchen in die gleiche Richtung ein und dehnen sich von der Unterseite des Kastens nahe dem Fuss der Abtrennung bis zu der Oberfläche des Sandes aus, wo sich Steilstufen bilden.

Das Verhalten des Sandes ist in beiden Fächern offensichtlich identisch. So veranschaulicht das doppelte Experiment, dass

- 1) Bruch schneller in Extension als in Kompression erreicht wird
- 2) Abschiebungen steiler als Aufschiebungen sind
- 3) die Klassifikation von Verwerfungen nach Anderson (Orientierung der Störungsfläche in Bezug auf das Spannungsellipsoid) in oberflächennahen Bedingungen anwendbar ist.



Experimentelle Verwerfungsbildung im Sand  
gezeichnet nach Experimenten von Hubbert 1961 *Geol. Soc. Am. Bull.* **62**, 355-372

## Zusammenfassung

Verwerfungen sind Brüche, entlang welchen Verschiebungen erfolgt sind. Die Verwerfungsflächen entsprechen nicht den theoretischen Flächen grösster Scherspannung. Dies deshalb, weil ein von der Lithologie abhängiger Reibungsfaktor die Bildung der Verwerfungsebene beeinflusst. Hohe Porenflüssigkeitsdrücke können Bruchbildung einleiten, unter welchen bei trockenen Bedingungen keine Änderung im mechanischen Zustand erfolgen würde.

Es werden drei verschiedene Verwerfungstypen unterschieden: 1) Abschiebungen, 2) Überschiebungen, und 3) Blattverschiebungen. Hauptverwerfungen bestehen aus einem zentralen Kern und einer umhüllenden Beschädigungszone. Verwerfungen entstehen unter spröden Voraussetzungen. Sie bilden sich aus kleinen Scherbrüchen, die sich fortpflanzen, miteinander zusammenwirken, sich verbinden, um schlussendlich grössere Verwerfungen zu bilden. Ihre Gesamtbewegung resultiert im Allgemeinen aus der Addition vieler kleiner Bewegungsereignisse. Verwerfungen stellen plötzliche Versetzungsereignisse dar, die mit Erdbeben im Zusammenhang stehen.

## Empfohlene Literatur

- Gupta A. & Scholz, C.H. 2000. A model of normal fault interaction based on observations and theory. *Journal of Structural Geology* **22**(7), 865-879.
- Hancock P.L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology* **7**(3/4), 437-457.
- Hubbert M.K. 1961. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geological Society of America Bulletin* **62**, 355-372.
- McClay K.R. 1992. *Thrust tectonics*. Chapman & Hall, London. 447 p.
- Monzawa N. & Otsuki, K. 2003. Comminution and fluidization of granular fault materials: implications for fault slip behavior. *Tectonophysics* **367**(1-2), 127-143.
- Ramsay J.G. & Huber, M.I. 1987. *The techniques of modern structural geology - Volume 2 : Folds and fractures*. Academic Press, London. 700 p.
- Twiss R.J. & Moores, E.M. 1992. *Structural geology*. W.H. Freeman & Company, New York. 532 p.
- Wernicke B. & Burchfiel, B.C. 1982. Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology* **4**(2), 105-115.
- Meschede M. (1994) *Methoden der Strukturgeologie*. Enke Verlag, Stuttgart. 169 S.